添付資料－１６

液垂れの痕跡に係る模擬試験による確認

１．目的

保護管内で確認された黒ずんだ液体が損傷箇所から浸入した場合に、液垂れの痕跡が残るかどうかについて、模擬液を用いた試験により確認した。

２．実施方法

キャップ溶接線付近から保護管内への廃液浸入を想定し、高レベル廃液模擬液※1を１滴（2 mm^3）ずつシーニング加工部の上端に静かに垂らして液垂れの傾向を確認するとともに、液垂れの痕跡がビデオスコープで観察可能かを確認した。

また、液が垂れてから長時間経過し、乾いた状態で液垂れの痕跡がビデオスコープで観察可能かを確認した。

なお、使用した保護管内面模擬体は、キャップとシームレス管からなる SUS304 製溶接構造物であり、内面の形状、寸法、キャップ溶接線の位置およびシーニング加工等の開先調整は実機を模擬したものとした。

※１： 高レベル廃液に含まれる元素を非放射性元素で模擬した硝酸溶液。
設計上の最終濃縮時の濃縮率を想定した高濃度模擬液と、今回、保護管内に浸入した液を想定した低濃度模擬液の２種類を用意した。
① 高濃度模擬液
硝酸濃度：8.5 mol/L、Fe：5.0 g/L、Cr：1.3 g/L、Ru：12.0 g/L、Ce：14.0 g/L、V：0.56 g/L（Np 代替）
② 低濃度模擬液
高濃度模擬液の約 1/10 の濃度のもの

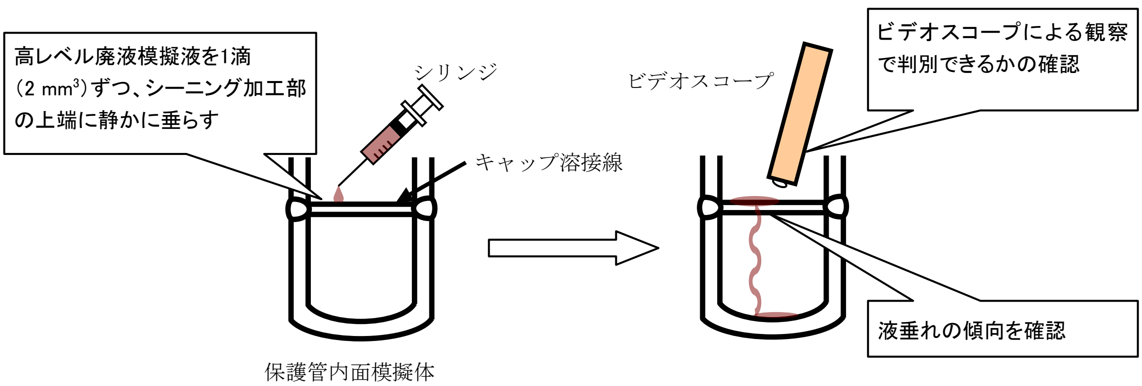


図１　液垂れの痕跡に係る模擬試験の概要

３．結果

主な結果を図２に示す。滴下開始後、７滴滴下した時点では模擬液はシーニング加工下端部に留まり液溜まりとなっているが、さらに滴下を継続すると液が留まり切れなくなって保護管底部に流れ出した。これに伴い形成されたシーニング加工部の液垂れの痕跡は、ビデオスコープによる観察で判別できる程度であることを確認した。

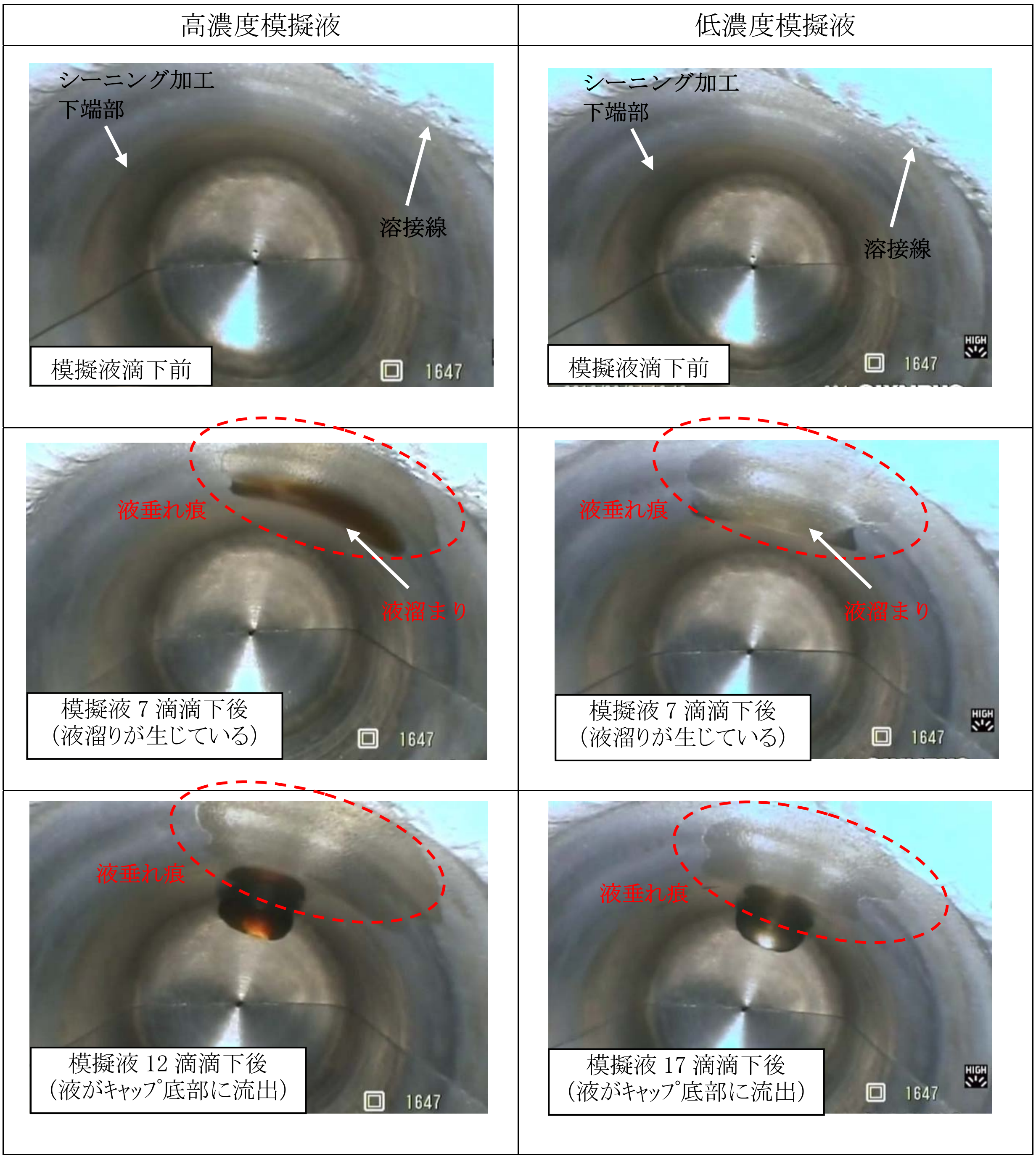


図２　液垂れの痕跡に係る模擬試験結果

次に、液が垂れてから長時間が経過して乾いた状態であっても、その痕跡が視認可能か否かを確認するために、比較的判別しづらい低濃度模擬液を用いて、自然乾燥させた後の液垂れの痕跡を観察した。

その結果を図３に示す。低濃度模擬液が保護管底部に流れ出すまで滴下し、その後約５日間自然乾燥させた状態でも、シーニング加工部に形成された液垂れの痕跡は、ビデオスコープの映像から判別できることを確認した。



低濃度模擬液
約５日間（114 時間）経過（自然乾燥後）

図３　液垂れの痕跡観察結果

４．評価

キャップ溶接線付近から液が浸入した場合には、シーニング加工部での液溜まり及び液が垂れた痕跡が残り、それらの痕跡はビデオスコープの映像から判別できる程度であることを確認した。

添付資料－１７

保護管に高レベル廃液が浸入したことに対する評価

１．はじめに

損傷状況調査として、カメラでの保護管内の観察により、保護管内部に黒色の液が確認されたこと、また、保護管内に挿入されていた温度計表面の付着物の分析の結果、濃縮缶内の液に含まれる核種が確認された。このことから、保護管内に確認された液は、濃縮缶内から保護管内に浸入したものと考えられる。

その後、保護管内の液の拭き取り、洗浄を実施した後、損傷部位及び損傷の大きさを確認するため圧力降下確認を実施したが、圧力降下は見られなかった。このことから、保護管の損傷の大きさは非常に小さいことが推定される。

損傷の大きさが小さい場合、濃縮缶内液が保護管内に浸入する想定として、毛細管現象と保護管損傷部位にかかる圧力上昇が考えられる。以下に保護管内への液浸入の想定を示す。

（保護管内への液浸入の想定）

- 保護管に微細な損傷が生じることで、毛細管現象により損傷部位内の液が上昇する。
- 損傷部位を超えて保護管内に液が浸入すると、損傷部位が水没し、毛細管現象により生じる圧力はなくなる。そのため、濃縮缶側から保護管先端にかかる圧力（濃縮缶内気相部の圧力＋濃縮缶内液による圧力）が保護管内（先端）圧力（保護管内気相部圧力）よりも大きい場合は、損傷の大きさに応じた流量で保護管内に液が浸入する。

上記の想定に基づき、液浸入に対する評価を行うため、毛細管現象に係る確認、損傷の大きさと液浸入の流量の関係等について、ビーカスケール及び実規模スケールにおいて確認を行った。

２．試験概要及び評価の流れ

（１）液体に係る評価

① 毛細管現象及び容器内への圧力による液の流入の確認

ガラス管を用いて毛細管現象による液体の流入を確認する。また、ガラス管内に圧力を加えることで、ガラス管内の液を押し込

むことが可能であることを確認する。試験はガラス管を縦向きまたは横向きに設置した装置（損傷が縦向きと横向きの場合を想定）を用いて行う。

② 濃縮缶の保護管への液浸入量に基づく液浸入時間と損傷の大きさの確認

ガラス管を用いて、孔径と加圧する圧力の違いによる液の流出流量をビーカスケール及び実規模スケールで確認する（保護管への液浸入の流量模擬）。試験はガラス管を縦向きまたは横向きに設置（損傷が縦向きと横向きの場合を想定）した装置を用いて行い、向きの違いによる影響を確認する。試験で確認された流量を理論式を用いて模擬できることを確認し、理論式から液浸入時間と損傷部の開口の大きさを評価する。

③ 拭取り後に保護管内に浸入した液量の評価に基づく損傷の大きさの確認

②と同様の確認を行い、理論式から拭取り後に保護管内に浸入した液量の評価に基づく開口の大きさを評価する。

（２）気体（空気）に係る評価

① 空気の排出流量から圧力降下が確認できる損傷の大きさ確認

圧力降下試験を実施したが、有意な圧力の降下は見られなかったため、24 時間中に約 10kPa の圧力降下があれば検知できる有意な降下とし、損傷の開口の下限値を算定する。

② 今後の損傷の進展への適用性

損傷部の開口の進展を評価するために、ガラス管の孔径を変えた場合のビーカ試験及び実規模試験から得られる空気の排出流量が理論式で模擬できることを確認し、その理論式を用いて今後の進展評価に対する適用性を検討する。

（３）総合評価

（1）（2）の結果より、それぞれのまとめと現状の損傷の程度及び今後の損傷の進展に係る評価方法を検討する。

① 液体に係る評価

② 気体に係る評価

③ 現状の損傷の程度

④ 今後の損傷の進展に係る評価方法

３．液体に係る評価

3.1 毛細管現象及び容器内への圧力による液の流入の確認

毛細管現象とは、細い管状物体の内側にある液体が管の中を上昇する現象である。毛細管現象の影響を確認するため、微小孔を持つガラス管内（孔径 100, 150, 200, 250μm）に流入した水の液面が上昇する高さを確認する。そして、ガラス管内に毛細管現象により生じる圧力と同等の圧力を加えることによって、ガラス管内の液面がガラス管外の水面と同じ高さになることを確認し、ガラス管内に上昇した液が毛細管現象によるものであることを確認する。さらに、毛細管現象により生じる圧力を超える圧力をガラス管内に加えることによって、ガラス管内の液面がさらに下がることも併せて確認する。

3.1.1 確認試験

図１に試験装置の概要を示す。

（１）ガラス管縦向き

① ガラス管を大気圧下で垂直に水面（ガラス容器）に浸し、ガラス管内に流入した水の高さを測定する。

② ガラス管内の液面がガラス容器の水面と同じ高さ（Y=0mm）になる圧力を測定する。本圧力は毛細管現象により生じる圧力となる。

③ ガラス管内の液面がガラス容器の水面から押し下がる高さ（Y=50mm, 100mm）になる圧力を測定する。本圧力は毛細管現象により生じる圧力＋ガラス容器内の液による圧力となる。

（２）ガラス管横向き

① 大気圧下でガラス管が水平にセットされた水槽にガラス管と同じ高さ（Y=0mm）まで水を入れ、ガラス管内に水が流入したことを確認する。

② ガラス管内の水がガラス管の先端まで移動する圧力を測定する。本圧力は毛細管現象により生じる圧力となる。

③ 水槽に Y=50mm 、100mm まで水を入れ、ガラス管内に水が流入したことを確認する。

④ ガラス管内の水がガラス管の先端まで移動する圧力を測定する。本圧力は毛細管現象により生じる圧力＋ガラス容器内の液による圧力となる。

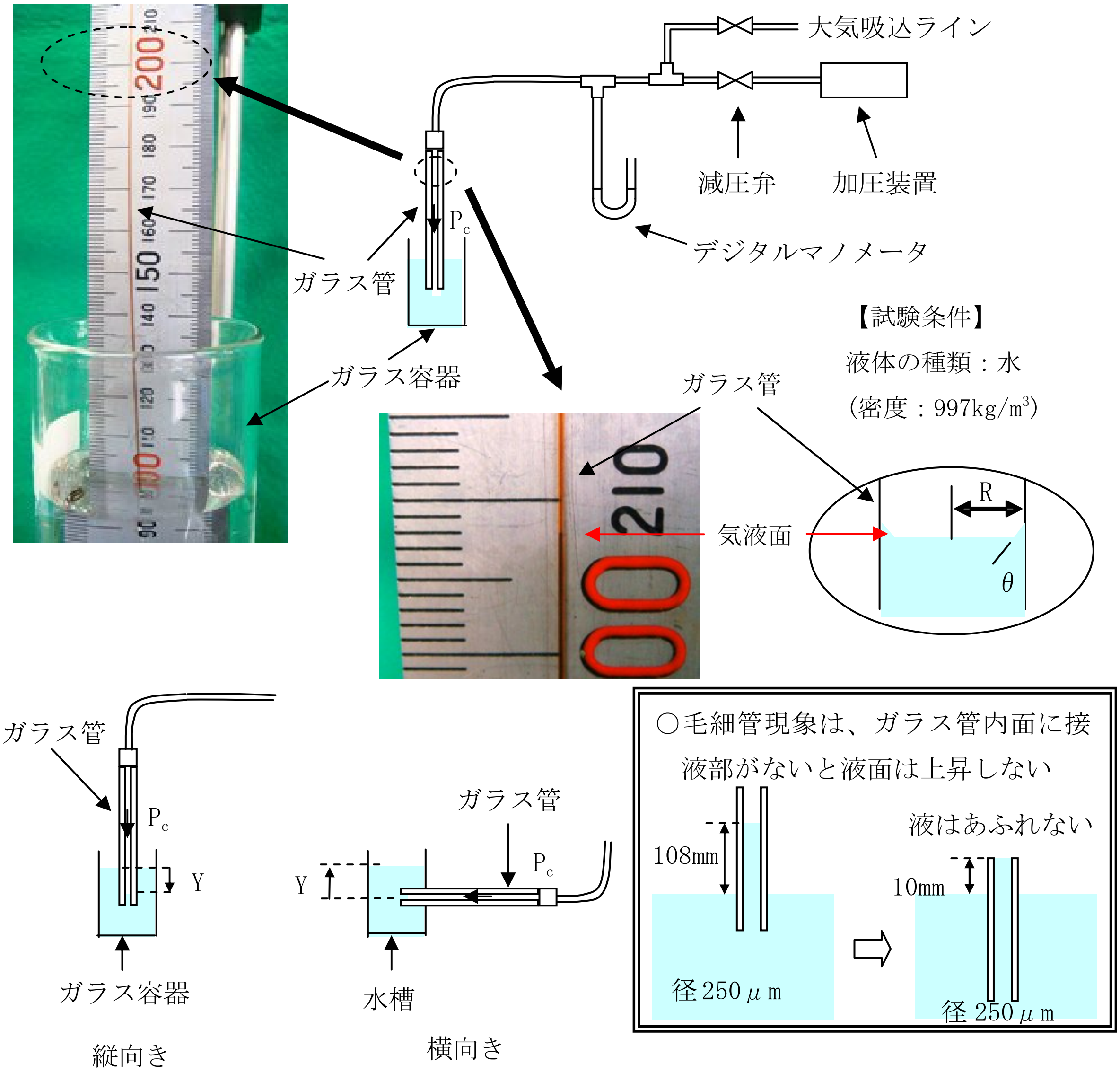


図１　試験装置概要

3.1.2 理論式

理論式[1)]は以下の式で表される。

σ：表面張力[N/m]、θ：接触角、D：孔の半径[m]

ρ：液体の密度[kg/m^3]、　g：重力加速度[m/s^2]

Y：水面から圧力により液面を押し込む高さ[m]

　横置きの場合は毛細管入口から水面までの長さ[m]

$$P_c = \frac{2\sigma\cos\theta}{D} + \rho \cdot g \cdot Y$$

＝毛細管現象により生じる圧力＋ガラス容器内の液による圧力

1）出典：「化学工学便覧　化学工学編　（改訂五版）」

3.1.3 試験結果と理論式の比較

表１に試験結果（縦向き）と理論値の比較結果を、表２に試験結果（横向き）と理論値の比較結果を示す。

表１　理論値と試験結果（縦向き）の照合

孔径 [μm]	ガラス管内に流入した液高さ [mm]	Y=0mmになる圧力 [kPa] (毛細管現象により生じる圧力)		Y=50mmになる圧力 [kPa]		Y=100mmになる圧力 [kPa]	
		理論値	試験結果	理論値	試験結果	理論値	試験結果
100	299	2.9	3.1	3.4	3.5	3.9	3.9
150	175	1.9	1.9	2.4	2.4	2.9	2.9
200	147	1.4	1.4	1.9	1.9	2.4	2.4
250	108	1.2	1.1	1.7	1.6	2.2	2.0

表２　理論値と試験結果（横向き）の照合

孔径 [μm]	Y=0mmになる圧力 [kPa] (毛細管現象により生じる圧力)		Y =50mmになる圧力 [kPa]		Y =100mmになる圧力 [kPa]	
	理論値	試験結果	理論値	試験結果	理論値	試験結果
100	2.9	2.9	3.4	3.4	3.9	3.9
150	1.9	1.9	2.4	2.5	2.9	2.9
200	1.4	1.4	1.9	1.9	2.4	2.4
250	1.2	1.1	1.7	1.6	2.2	2.0

試験の結果、以下を確認した。

（１）微小孔を持つガラス管を液に浸したところ、孔径が小さいほど、ガラス管内に流入した水の液面が高いことを確認した。

（２）毛細管現象により生じる圧力と同等の圧力をガラス管内に加えることにより、以下を確認した。

① ガラス管が縦向きの場合、ガラス管内の液がガラス容器の水面と同じ高さになった。

② ガラス管が横向きの場合、水槽にガラス管と同じ高さ（Y=0mm）まで液を入れた状態で、ガラス管内の液面がガラス管の先端まで移動した。

（３）ガラス管の向きに関係なく、毛細管現象により生じる圧力は理論値と試験結果でほぼ一致した。

⇒ ガラス管内の液の上昇は毛細管現象によるものと確認した。

（４）毛細管現象による圧力を超える圧力をガラス管内に加えることにより、以下を確認した。

① ガラス管が縦向きの場合、ガラス管内の液はガラス容器の水面より押し下げることができた。

② ガラス管が横向きの場合、水槽の水面高さに応じてガラス管内に流入した液がガラス管の先端まで移動した。

（５）ガラス管の向きに関係なく、毛細管現象により生じる圧力とガラス容器内の液による圧力の合算値は理論値と試験結果でほぼ一致した。

⇒ ガラス管内に流入した液は、圧力を加えることにより押し出すことができることを本試験により確認した。

3.1.4 考察

・ 毛細管現象により生じる圧力は理論値（接触角：$\theta=0°$ とした場合）と試験結果でほぼ一致した。
・ 損傷部が微細な場合、毛細管現象により損傷部に液が流入するが、毛細管現象だけでは保護管内へ液は流入しないことを確認した。
・ 圧縮空気による加圧を行ったとしても、毛細管現象により生じる圧力の大きさによっては、損傷部の液は押し出せない可能性があることを確認した。
・ 図２に孔径と理論式から算出した毛細管現象により生じる圧力の関係を示す。

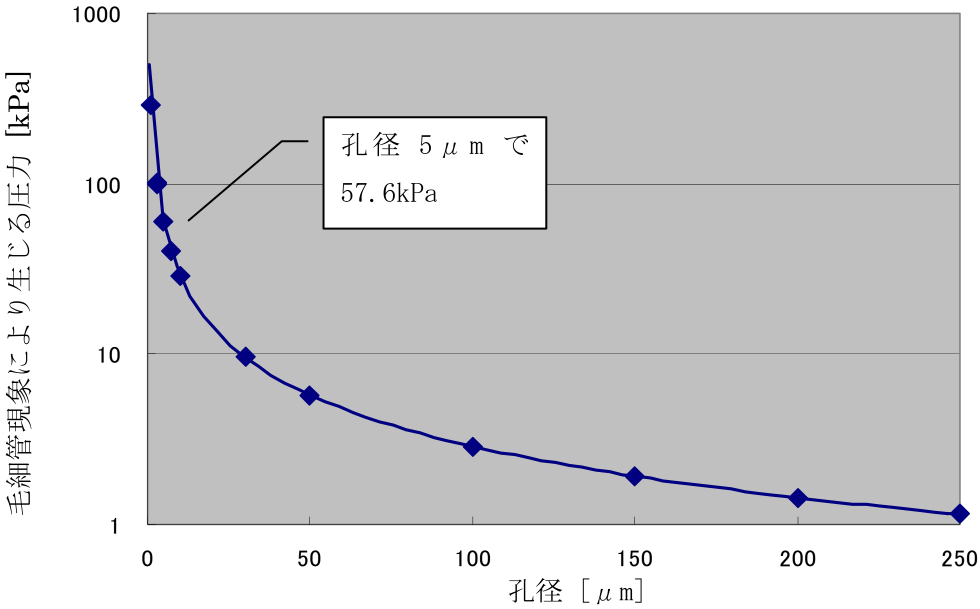


図２　孔径と毛細管現象により生じる圧力の関係

・ 文献[2)] において、「接触角 θ は固体壁及び表面をおおう流体の種類によって異なるが、常温でよくみがかれたガラス壁で空気と水のような液体が接すると、その液体が壁を完全にぬらすために接触角 θ≒0 になる。」とあることから、3.1.3 の結果は妥当なものであると考えられる。

　２）　出典：水力学／今木清康　著（理工学社）

・ しかしながら実際の損傷は θ≒0° となるような「よくみがかれた」状態であるとは考えられず、接触角はより大きいと推定する。

・ よって、実機の損傷における毛細管現象により生じる圧力はガラス試験の結果よりは小さく、浸入しがたい（圧縮空気により押し出しやすい）方向と推定できる。

・ 毛細管現象は、表面張力によって液が縮まろうとする方向に力が加わっていることで生じる現象であり、管の内面に接液部がなくなると上昇が止まる。よって、毛細管現象のみによる保護管内への液の浸入はなく、別の上昇圧力（気相圧や容器内の液による圧力）が加わることによって微細な損傷部位から保護管内に液が浸入することになる。

3.2 濃縮缶の保護管への液浸入量に基づく液浸入時間と損傷の大きさの確認

3.2.1 確認試験

（1） ビーカ試験

ガラス管を用いて、ガラス管の孔径と加圧圧力の違いによる液の流出流量を確認する。その結果から、孔径と流出流量の関係と加圧圧力と流出流量の関係を明確にする。さらに微小すき間の式に基づき実験結果による評価式を算出し、評価式から得られた流量と本試験による流出流量の差を明らかにする。また、損傷の形状を円管状と仮定し、円管を層流で流れる流量を表すハーゲン・ポアズイユの式と本試験による流出流量の差を孔径との関係から明らかにする。

① ガラス管縦向き

ガラス管を縦向きにセットし、孔径と圧力の条件を変化させた試験をビーカスケールにて行い、流出流量を確認する（図３　参照）。

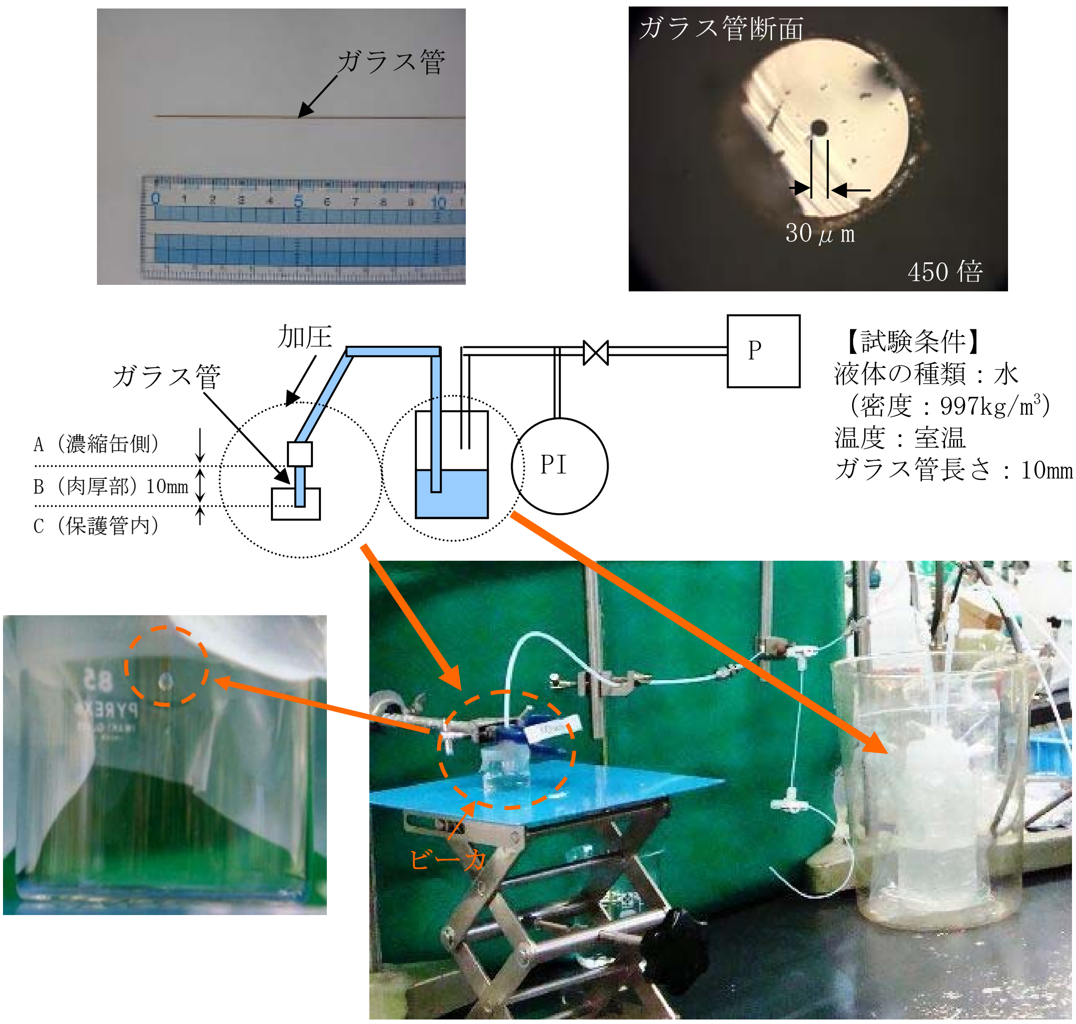


図３　ビーカ試験装置概要図（縦向き）

a. 試験方法

（ア） 加圧して、ガラス管から水がでることを確認した後、試験圧力（55kPa、または101kPa）に調整する。

（イ） 予め風袋重量を測定したビーカを設置し、有意量の水が流出するまで加圧し続け（時間を計測）、ビーカ総重量を測定する。

（ウ） ビーカの総重量と風袋重量の差から、溶液重量を算出し、密度を用いて流出容量に換算し、流出流量を算出する。

（エ） ビーカへ流出した後の水の蒸発を考慮し、ビーカをフィルムで覆った状態で試験を実施する。

b. 試験結果

ガラス管を縦向きにセットし、加圧圧力を55kPa，101kPaに変化させた場合の各孔径に対する流出流量を表３のとおり確認した。

表３ ビーカ試験（縦向き）の結果

孔径［μm］	加圧圧力［kPa］	測定時間［s］	流出容量［cm^3］	流出流量［cm^3/s］
10	55	3600	0.0039	1.1×10^{-6}
30		1800	0.2127	1.2×10^{-4}
100		180	2.295	1.3×10^{-2}
150		60	3.279	5.5×10^{-2}
200		60	7.100	1.2×10^{-1}
250		60	11.83	2.0×10^{-1}
5	101	46800	0	流出なし
10		3600	0.0128	3.6×10^{-6}
30		1200	0.3190	2.7×10^{-4}

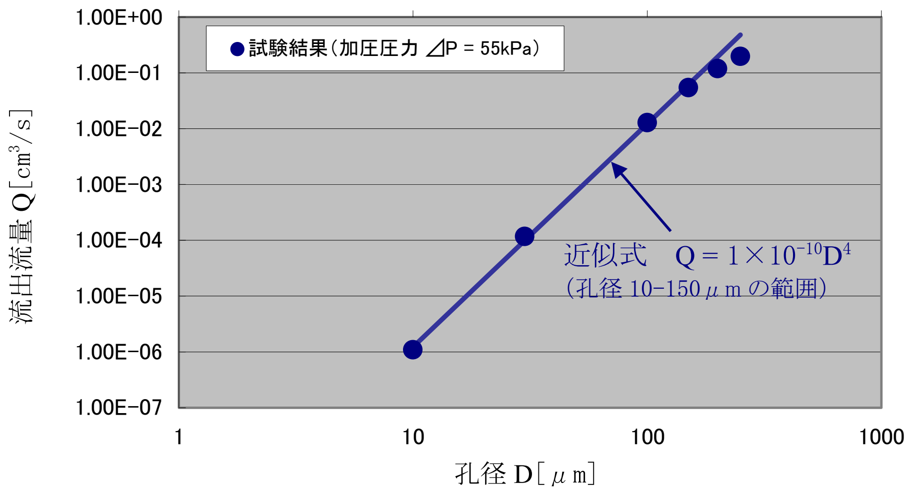


図４　加圧圧力 55kPa における流出流量と孔径の関係

図４より、試験結果である流出流量は、孔径 10～150μm の範囲でガラス管の孔径の４乗に比例（近似式 $Q = 1\times10^{-10}D^{4.0}$）した。

また、ビーカ試験にて、孔径を 10μm、30μm として、圧力差を変化（⊿P=55kPa 及び⊿P=101kPa）させた時の流量を測定した。結果を図５に示す。

全般的には孔径 10μm、30μm ともに流量が圧力差にほぼ比例することを確認した。ただし、圧力が小さいときに試験結果である流量が近似式での流量に対して若干低めに出ている。

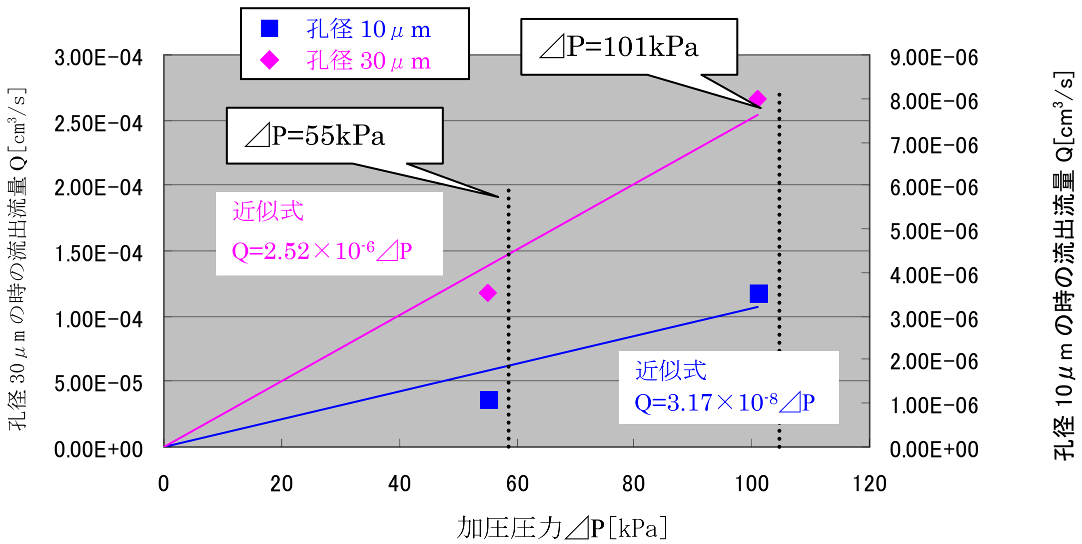
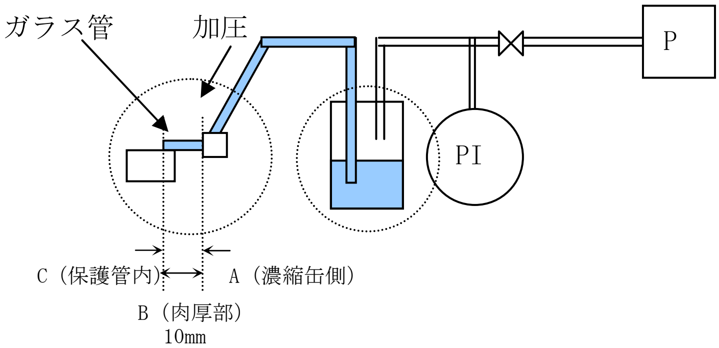
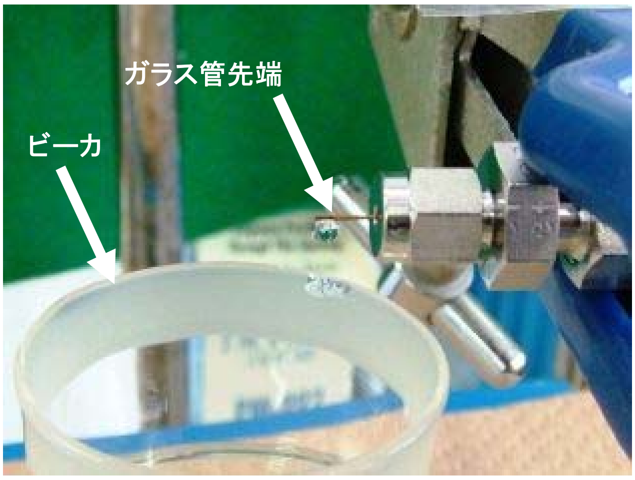


図５　孔径 10μm、30μm における流出流量と加圧圧力の関係

② ガラス管横向き

ガラス管を横向きにセットし、孔径と圧力の条件を変化させた試験をビーカスケールにて行い、流出流量を確認する（図６　参照)。





【試験条件】
液体の種類：水
（密度：997kg/m^3）
温度：室温
ガラス管長さ：10mm

図６　ビーカ試験装置概要図（横向き）

a. 試験方法

（ア）加圧して、ガラス管から水がでることを確認した後、試験圧力（55kPa）に調整する。

（イ）予め風袋重量を測定したビーカを設置し、有意量の水が流出するまで加圧し続け（時間を計測）、ビーカ総重量を測定する。

（ウ）ビーカの総重量と風袋重量の差から、溶液重量を算出し、密度を用いて流出容量に換算し、流出流量を算出する。

b. 試験結果

ガラス管を横向きにセットし、加圧圧力を55kPaとした場合の各孔径に対する流出流量を表４のとおり確認した。

表４　ビーカ試験（横向き）の結果

孔径［μｍ］	加圧圧力［kPa］	測定時間［s］	流出容量［cm^3］	流出流量［cm^3/s］
10	55	3600	0.0027	7.5×10^{-7}
30		1800	0.2120	1.2×10^{-4}
100		180	2.322	1.3×10^{-2}
150		60	3.222	5.4×10^{-2}
200		60	7.154	1.2×10^{-1}
250		60	11.77	2.0×10^{-1}

③ ビーカ試験におけるガラス管の縦向きと横向きの比較

ビーカ試験における、ガラス管の縦向きと横向きの結果を比較したところ、表５のとおり、いずれの孔径の場合においても、両者の流出流量はほぼ一致した。

表５　ビーカ試験（縦向きと横向き）の比較

孔径［μｍ］	加圧圧力［kPa］	測定時間［s］	縦向き		横向き	
			流出容量［cm^3］	流出流量［cm^3/s］	流出容量［cm^3］	流出流量［cm^3/s］
10	55	3600	0.0039	1.1×10^{-6}	0.0027	7.5×10^{-7}
30		1800	0.2127	1.2×10^{-4}	0.2120	1.2×10^{-4}
100		180	2.295	1.3×10^{-2}	2.322	1.3×10^{-2}
150		60	3.279	5.5×10^{-2}	3.222	5.4×10^{-2}
200		60	7.100	1.2×10^{-1}	7.154	1.2×10^{-1}
250		60	11.83	2.0×10^{-1}	11.77	2.0×10^{-1}

④ 損傷の数の違いによる液の流出流量の確認

損傷箇所が複数ある場合の影響を確認するため、 ガラス管の本数を１本、５本、１１本と変えた３種類の保護管先端モデルを用意し、それら保護管先端モデルを水に漬け、ガラス管を通じて流入した水の高さから、それら流入流量を確認した（図７　参照)。

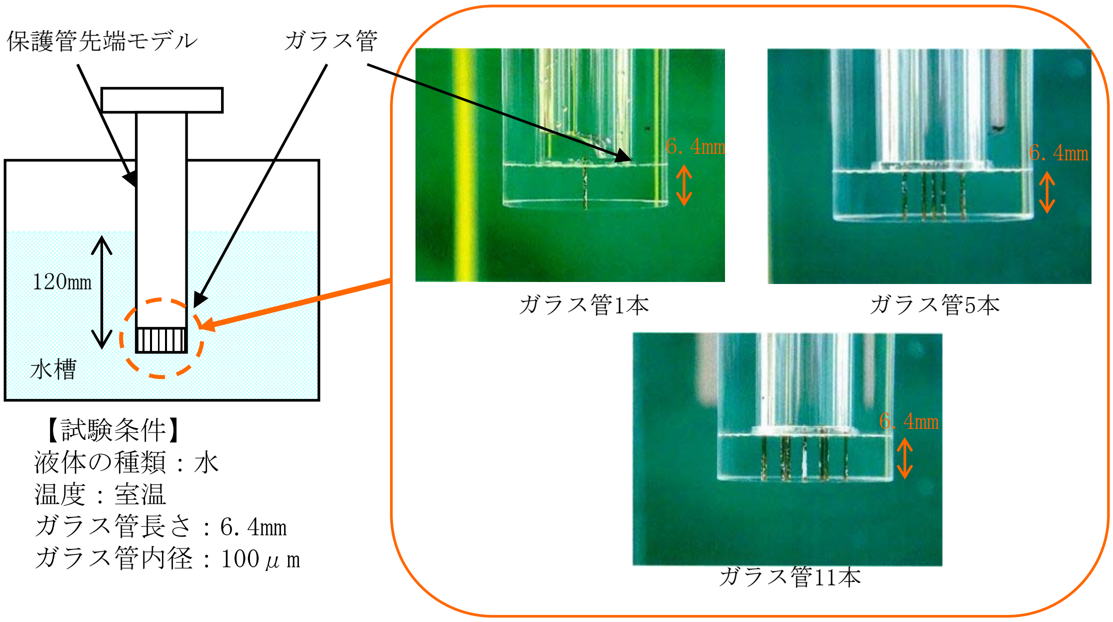


図７　複数本数のガラス管を使用した液流入量確認概要図

結果、ガラス管の本数を変えた場合の流入流量は以下のとおりとなった。また、ガラス管の本数と流入流量の関係は図８のとおりであり、流入流量はガラス管の本数におおよそ比例することを確認した。

表６　液流入量確認の結果

ガラス管本数［本］	測定時間［s］	流入高さ［mm］	流入流量［cm^3/s］
1	3600	12.5	4.1×10^{-4}
5	1800	23.0	1.5×10^{-3}
11	1800	67.0	4.4×10^{-3}

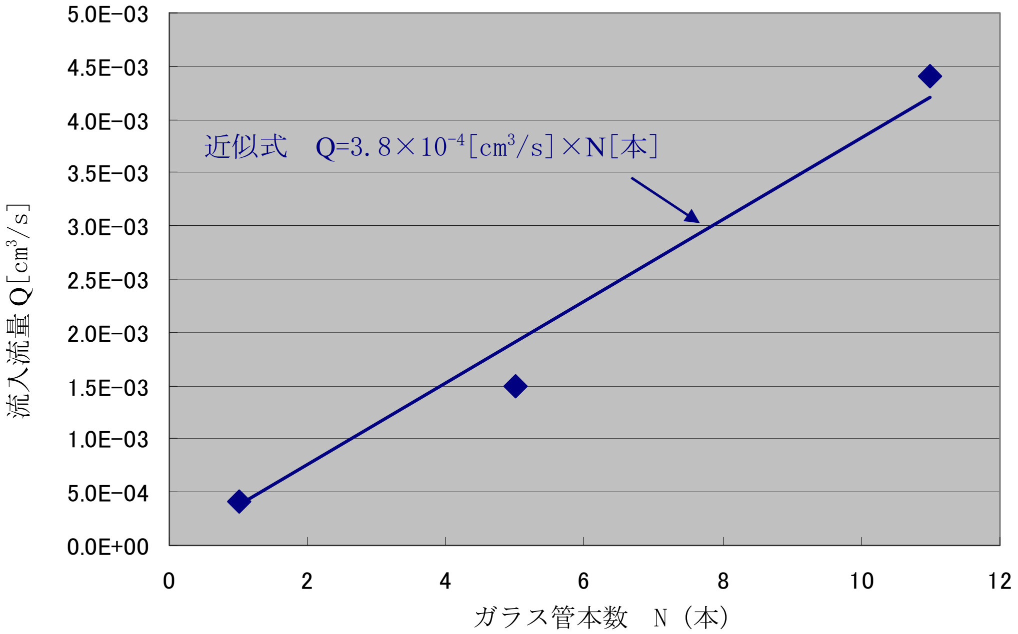


図８　ガラス管本数と流入流量の関係

・評価式より流量は直径 d の４乗に比例することから、１本当たりの流量 q は以下となる（K:比例定数）。

$$q = K \cdot d^4 \quad \cdots(1)$$

N 本の孔を１本の孔に置き換えると(1)式および試験結果より以下となる。

$$Q = Nq = N \cdot K \cdot d^4 \quad \cdots(2)$$

・また、１本の孔に置き換えた場合（図９　参照）の流量は、直径 D の４乗に比例し、K は孔の前後の圧力差、流体の性状、孔の形状により決まる値なので K は１本でも複数本でも同一であることから、　１本あたりの流量は以下となる。

$$Q = K \cdot D^4 \quad \cdots(3)$$

・(2)式及び(3)式より、N 本ある１本の孔径 d を１本の孔径 D に置き換えた場合の関係は以下となる。

$$D^4 = N \cdot d^4 \quad \cdots(4)$$

・d＝30μｍとしたときの孔の本数による等価直径Ｄは表７のとおり。

表７　孔の本数と等価直径

孔の本数 Ｎ（本）	1本あたりの直径 ｄ（μｍ）	等価直径 Ｄ（μｍ）
1	30.0	30.0
2		35.7
3		39.5
4		42.4
5		44.9

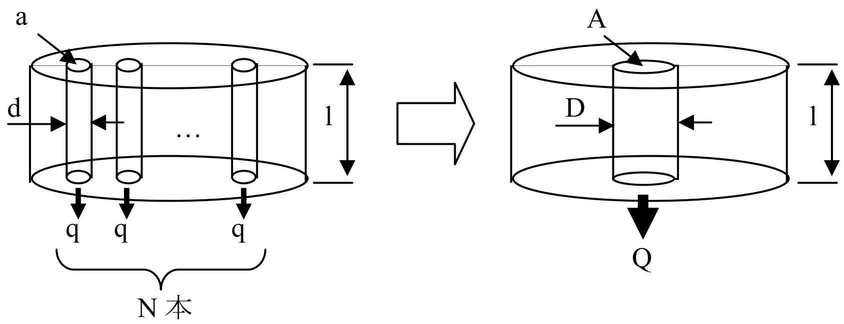


図９　Ｎ本の孔による流量から１本の孔として等価した場合の直径

（２）実規模試験

実機を模擬した装置に保護管先端モデル（孔が縦向き）をセットし、そのモデルの先端にかかる圧力の違いと孔径の違いによる液の流入流量を確認する（図１０　参照）。

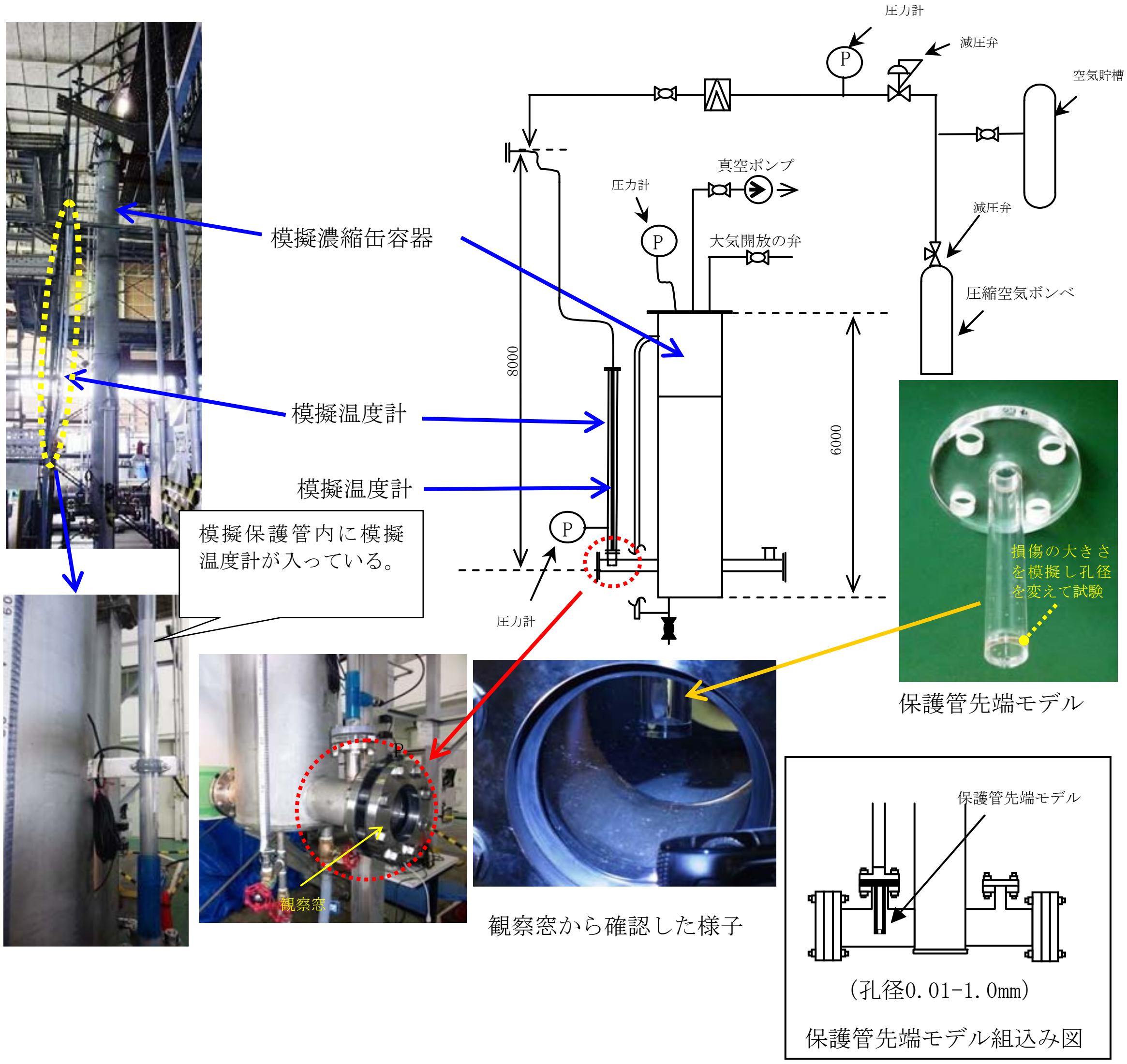


図１０　実規模試験装置概要図

① 試験方法

a. 保護管先端モデル（以下、「先端モデル」という。）を装置に取付け、模擬濃縮缶容器に水を注入する。

b. 先端モデルの先端に所定の圧力を加える。

【35kPa の場合】

先端モデルの先端に 35kPa がかかるまで模擬濃縮缶容器内に水を注入する。

【95kPa の場合】

先端モデル内を真空ポンプで減圧し、さらに模擬濃縮缶容器内に水を注入することで、先端モデルの先端に 95kPa を加える。

c. 有意量の水が先端モデルに流入するまで試験を継続し流入容量と経過時間を記録する。

d. 流入容量を確認する。

先端モデルに記載の目盛から流入高さを求め、流入高さと先端部の断面積※1をかけ合わせて、流入容量を算出する。

e. 試験後、模擬濃縮缶容器、先端モデル側ともに大気開放弁を開操作することにより大気開放する。

※ 1 先端モデルに外径 6 ㎜の温度計を挿入しているので、先端部の断面積は以下の数値となる。

先端部の断面積＝先端モデルの断面積－温度計の断面積

$$＝(12\text{ ㎜}/2)^2\pi-(6\text{ ㎜}/2)^2\pi＝84.8\text{ ㎜}^2$$

② 試験結果

孔径の違いと先端モデルの先端にかかる圧力の違いにより、先端モデル内に流入した液の流入流量を表８のとおり確認した。

表８　実規模試験の結果

孔径［μm］	先端モデルの先端にかかる圧力［kPa］	測定時間［s］	流入容量［cm^3］	流入流量［cm^3/s］
10	35	157200	0.2	1.3×10^{-6}
30		14827	1.9	1.3×10^{-4}
10	95	64800	0.2	3.3×10^{-6}
30		8300	2.8	3.3×10^{-4}

（３） ビーカ試験結果が実規模試験に適応できることの確認

ビーカ試験のガラス管縦向きと実規模試験の結果を比較したところ、ビーカ試験での加圧圧力及びガラス管長さ補正を行った後の流量と実規模試験での流量はほぼ同等とみなせることを表９のとおり確認した。

表９　ビーカ試験のガラス管縦向きと実規模試験の比較

孔径[μm]	ビーカ試験の縦向き				実規模試験	
	圧力差※2 [kPa]	流量 [cm^3/s]	圧力差補正後流量※3 [cm^3/s]	ガラス管長さ補正後流量※4 [cm^3/s]	圧力差※2 [kPa]	流量 [cm^3/s]
10	55	1.1×10^{-6}	6.9×10^{-7}	1.2×10^{-6}	35	1.3×10^{-6}
30		1.2×10^{-4}	7.5×10^{-5}	1.3×10^{-4}		1.3×10^{-4}
10	101	3.6×10^{-6}	3.4×10^{-6}	5.6×10^{-6}	95	3.3×10^{-6}
30		2.7×10^{-4}	2.5×10^{-4}	4.2×10^{-4}		3.3×10^{-4}

※２　圧力差とは、ハーゲン・ポアズイユの式の⊿P に相当する圧力であり、ビーカ試験では加圧圧力となる。また、実規模試験では先端モデルの先端にかかる圧力である。

※３　ハーゲン・ポアズイユの式から、流量は圧力差に比例するとし、55kPa の結果から 35kPa の流量を計算し、101kPa の結果から 95kPa の流量を計算した。

※４　ハーゲン・ポアズイユの式から、流量はガラス管長さに反比例するとし、ビーカ試験（長さ 10 mm）の値を実規模試験（長さ 6 mm）に合わせて補正した。

3.2.2 理論式

（１）ハーゲン・ポアズイユの式

円管を層流で流れる流量を表すハーゲン・ポアズイユの式を以下に示す。

ハーゲン・ポアズイユの式：

$$Q=\frac{\pi}{128\times\mu\times L}\times D^4\times\Delta P\times10^{-12}\quad\cdots(5)$$

Q ：流量　　μ ：粘性係数

L ：微細孔を有する管の長さ

D ：孔径

ΔP ：圧力差

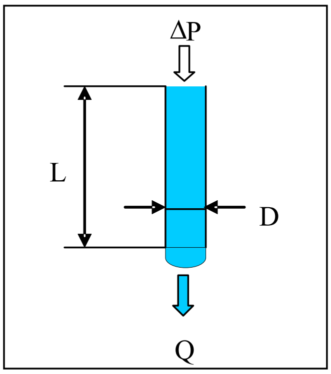


図１１　微細孔を有する管からの流出モデル

（２）オリフィスの式

損傷の形状を円管状とする仮定のほかに、オリフィス状と仮定し、以下のオリフィスの式を用いて、損傷の開口の大きさを評価する。

なお、今回評価対象となる開口の径では開口比が小さく、オリフィス流量計の計算式の適用範囲の最小値未満となるが、開口比の適用範囲の最小値から算出した流量係数と開口比をゼロとした流量係数はほとんど変わらないため、損傷の開口の大きさを概算するためのオリフィスの式として、オリフィス流量計の計算式を用いた。

【オリフィスの式】

$$Q = C_d \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \cdots (6)$$

C_d ：流量係数　　　D ：孔径

P_1 ：入口圧力　　　P_2 ：出口圧力

ρ ：密度

ここでC_dは、以下の式によって求められる。

$$C_d = 0.597 - 0.011m + 0.432m^2$$

m ：開口比（$m = \left(\frac{D^2}{{D_{pipe}}^2}\right)$）

D_{pipe} ：保護管内径、$D \ll D_{pipe}$ より $m \to 0$ とすると、C_d は 0.597 と近似できる。

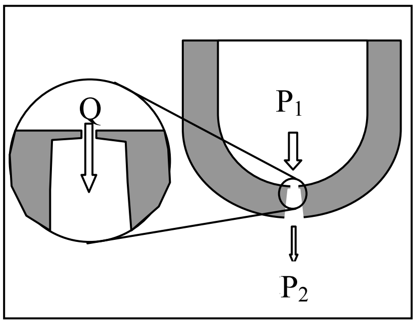


図１２　オリフィスの概要図

3.2.3 試験結果と理論式の比較

（１）ビーカ試験（縦向き）と理論式(ハーゲン・ポアズイユの式)の比較

ビーカ試験（縦向き）において得られた結果とハーゲン・ポアズイユの式で算出した結果を比較した結果を表１０に示す。

なお、オリフィスの式については、試験を円管で行ったため比較を行っていない。

表１０　ビーカ試験結果とハーゲン・ポアズイユの式で算出した流出流量

孔径 [μm]	加圧圧力 [kPa]	試験結果 [cm^3/s]	理論式での流出流量[cm^3/s]	試験結果と理論式の差※5 [%]
10	55	1.1×10^{-6}	1.3×10^{-6}	-15
30		1.2×10^{-4}	1.1×10^{-4}	9
100		1.3×10^{-2}	1.3×10^{-2}	0
150		5.5×10^{-2}	6.8×10^{-2}	-19
200		1.2×10^{-1}	2.2×10^{-1}	-45
250		2.0×10^{-1}	5.3×10^{-1}	-62
5	101	流出なし	1.5×10^{-7}	-
10		3.6×10^{-6}	2.5×10^{-6}	44
30		2.7×10^{-4}	2.0×10^{-4}	35

※　5【試験結果と理論式の差】$=\dfrac{（【試験結果】－【理論式での流出流量】）}{【理論式での流出流量】}$

ビーカ試験結果と理論式によって得られた結果との比較において、孔径 10～150μm 程度では流出流量は比較的差が小さく、孔径 150μm よりも大きい場合ではその差が大きくなる傾向が見られた。また、孔径５μm では、水の流出を確認できなかった。

（２）実規模試験と理論式（ハーゲン・ポアズイユの式）の比較

実規模試験において得られた結果とハーゲン・ポアズイユの式で算出した結果を比較した結果を表１１に示す。

なお、オリフィスの式については、試験を円管で行ったため比較を行っていない。

表１１　実規模試験結果と理論式で算出した流出流量について

孔径 [μm]	加圧圧力 [kPa]	試験結果 [cm^3/s]	理論式での流出流量 [cm^3/s]	試験結果と理論式の差※6 [%]
10	35	1.3×10^{-6}	1.3×10^{-6}	0
30		1.3×10^{-4}	1.1×10^{-4}	18
10	95	3.3×10^{-6}	3.6×10^{-6}	-8
30		3.3×10^{-4}	3.0×10^{-4}	10

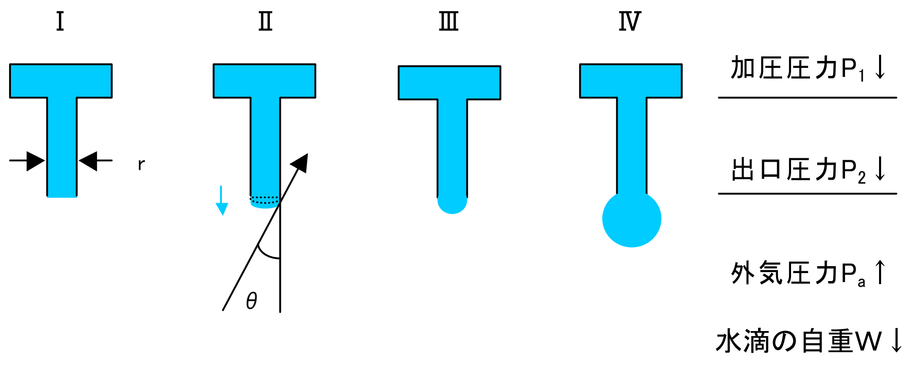
※　6【試験結果と理論式の差】$=\dfrac{（【試験結果】－【理論式での流出流量】）}{【理論式での流出流量】}$

流出流量の試験結果に対して理論式の値は、ほぼ一致している結果となった。

3.2.4 考察

流出流量の試験結果に対して理論式の値は、孔径5μmでの結果を除き、ほぼ模擬できている結果となったが、次のようなことからの差異があるものと考える。

・ 表１０のビーカ試験において、孔径が小さいときには表面張力の影響によって流量が小さくなる傾向が見られる。この表面張力の影響によって、孔径 5μm のガラス管において水の流出がなかったこと及び加圧圧力が 55kPa のときには試験の流量が理論流量よりも小さくなる傾向を示した。なお、実機においては下から上に流れる方向であるため、保護管内に液がたまると、基本的には表面張力の影響はない。
・ 表１０の結果において、孔径 200μm 以上の場合には、流出流量について差が大きくなる傾向が見られた。これは、ビーカ試験において、水を大きなチューブからガラス管の孔へ押し込んでいるため、縮流による抵抗が大きくなり、誤差も大きくなる傾向を示したと考える。
・ 複数本の孔があった場合、流量は本数に比例するので、１本の孔の等価直径として複数本の孔の大きさを評価できる。



Ⅰ. 水を P_1 で加圧するとⅠの状態まで液面が下がる。

Ⅱ. 水は液面でⅡのように膨らむ。表面張力は液面の接平面に働き、この接平面の鉛直方向に表面張力による流出の抵抗力が発生する。

Ⅲ. θ=0°のときが表面張力による抵抗力の最大値であり、このときに⊿P=0 になる孔径が流出限界の孔径となる（⊿P には液滴の自重も考慮)。

Ⅳ. ⊿P>0 であれば流出が続き、表面張力による抵抗力=液滴の自重になると液滴が垂れて、Ⅰの状態に近い状態に戻る。

図１３　表面張力による影響

3.2.5 実機への適用性

ハーゲン・ポアズイユの式、オリフィスの式により約 7cm³ の液が保護管内に浸入した際の開口の大きさと液浸入に要する時間との関係について評価する。条件としては、運転中の廃液であることから高レベル濃縮廃液とし、濃縮缶内液位を通常運転液位として評価を行った結果を表１２に示す。

表１２　約7cm³の液が浸入した際の開口の大きさ[μm]と液浸入に要する時間との関係

液浸入に要する時間[時間]	損傷の形状を円管状と仮定	損傷の形状をオリフィス状と仮定
	ハーゲン・ポアズイユの式	オリフィスの式
10	43	8
100	24	2
500	16	1
1000	14	0.8
5000	9	0.3
8760	8	0.3

ハーゲン・ポアズイユの式及びオリフィスの式について、開口と液浸入に要する時間との関係を図１４に示す。

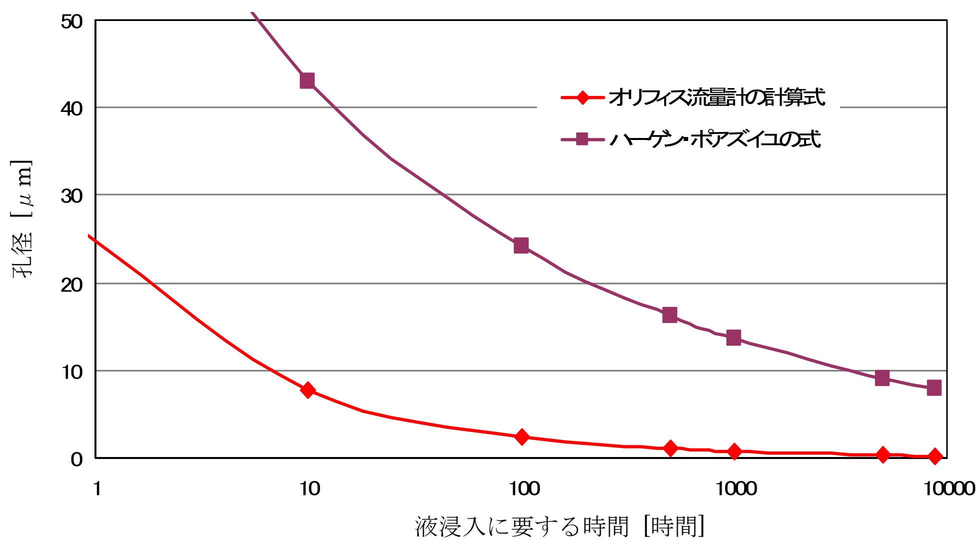


図１４　液浸入に要する時間と開口の評価結果

保護管内に確認された約 $7cm^3$ の液が浸入するのにかかる時間が 100 時間の場合では損傷部の開口が 2～24μm、500 時間の場合では開口が 1～16μm、5000 時間の場合では開口が 0.3～9μm という計算結果であった。オリフィスの式については、管路の摩擦抵抗を含まないので液浸入の流量がハーゲン・ポアズイユの式に比べて大きくなる。このため、オリフィスの式から算定した開口は小さい値を示す。

3.3 拭取り後に保護管内に浸入した液量の評価に基づく損傷の大きさの確認

3.3.1 確認試験

3.2.1 で実施した確認試験を使用する。

3.3.2 理論式

（１）ハーゲン・ポアズイユの式

3.2.2（１）に記載の(1)式を用いて、硝酸の粘性係数を代入して流量を算定する。

（２）オリフィスの式

3.2.2（２）に記載の(2)式を用いて、硝酸の密度を代入して流量を算定する。

3.3.3 試験結果と理論式の比較及び 3.3.4 考察

3.3.3 及び 3.3.4 に記載すべき事項は水を用いた試験結果と 3.3.2 からの理論値の比較・考察を記載する必要があるが、3.2.3 及び 3.2.4 と同様の記載となるので省略した。

3.3.4 実機への適用

添付資料－１４において、保護管内部を拭取りした後液の浸入確認をするまでの時間が 20 時間であったことから、約 $0.06cm^3$ / 20 時間の流入流量で浸入したとして評価する。条件としては、洗浄後の廃液であることから硝酸とし、濃縮缶内液位を 120mm として評価を行った結果を表１３に示す。

表１３　拭取り後に保護管内に浸入した液量の評価に基づく開口の大きさ[μm]

損傷の形状を円管状と仮定	損傷の形状をオリフィス状と仮定
ハーゲン・ポアズイユの式	オリフィスの式
約 40（37.7）	約 2（1.9）

開口の大きさは、評価上、10μm 単位で扱った。()は計算値を示す。

４．気体（空気）に係る評価

4.1　空気の排出流量から圧力降下が確認できる損傷の大きさ確認

圧力降下試験を実施したが、有意な圧力の降下は見られなかったため、24 時間中に約 10kPa の圧力降下があれば検知できる有意な降下とし、損傷の開口の下限値を算定する。

4.1.1　確認試験

①ガラス管縦向き

ガラス管を縦向きにセットし、55kPa で加圧した状態で空気がガラス管から排出する試験をビーカスケールにて行い、排出流量から圧力降下量を確認した（図１５　参照）。

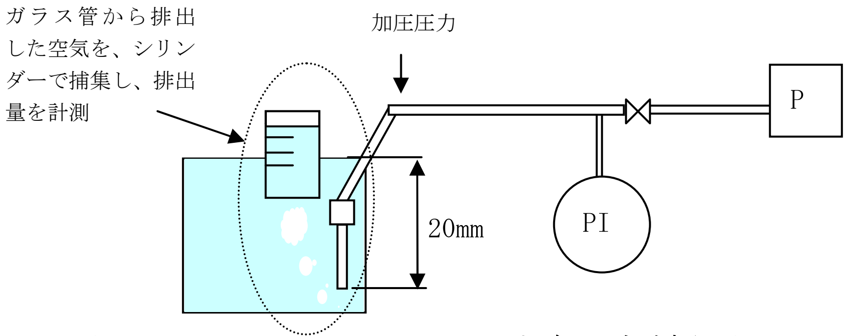


図１５　ビーカスケールの圧力降下試験概要図

表１４　ビーカスケールの圧力降下試験

孔径 [μm]	加圧圧力 [kPa]	測定時間 [s]	空気排出量 [cm^3]	排出流量 [cm^3/s]	100kPa での排出流量※7 [cm^3/s]	24 時間後の圧力の変化率 [%]※8	検知可否
10	55	57600	5.6	9.7×10^{-5}	1.8×10^{-4}	0.2	不可
30	55	180	1.7	1.0×10^{-2}	1.8×10^{-2}	22.4	可

※　7　加圧圧力 55kPa を 100kPa で補正。

※　8　保護管とガイドパイプの容量 $3.4\times10^3cm^3$ として計算。

上記結果によると孔径 10μm であると、空気は排出されるもののその変化率は 0.2%程度であり、有意な圧力降下は確認できない。一方、孔径 30μm であると有意な圧力変化が確認できる。

なお、本試験中においては、液がガラス管内へ流入していないことも併せて確認した。

②ガラス管横向き

ガラス管を横向きにセットし、55kPa で加圧した状態で空気がガラス管から排出する試験をビーカスケールにて行い、排出流量から圧力降下量を確認した（図１６　参照）。

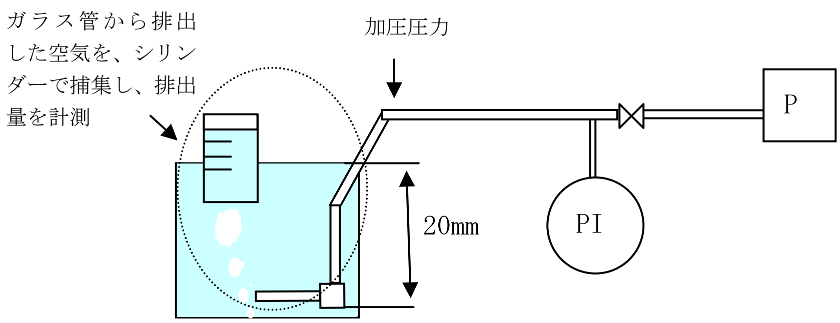


図１６　ビーカスケールの圧力降下試験概要図

表１５　ビーカスケールの圧力降下試験

孔径 [μm]	加圧圧力 [kPa]	測定時間 [s]	空気排出量 [cm^3]	排出流量 [cm^3/s]	100kPa での排出流量 [cm^3/s]	24 時間後の圧力の変化率 [%]	検知可否
10	55	57600	6.1	1.1×10^{-4}	2.0×10^{-4}	0.3	不可
30	55	180	1.6	9.0×10^{-3}	1.6×10^{-2}	20.4	可

表１５の結果によると孔径 10μm であると、空気は排出されるもののその変化率は 0.3%程度であり、有意な圧力降下は確認できない。一方、孔径 30μm であると有意な圧力変化が確認できる。

なお、本試験中においては、液がガラス管内へ流入していないことも併せて確認した。

③ガラス管の縦向きと横向きの比較

下表のビーカ試験での圧力降下試験の結果を比較すると、ガラス管を縦向きと横向きにセットした場合での孔径と排出流量の関係はほぼ同等とみなせる結果となったことを表１６のとおり確認した。

表１６　ビーカ試験の圧力降下試験（縦向きと横向き）の比較

孔径 ［μｍ］	縦向き		横向き	
	排出流量 ［cm^3/s］	24時間後の 圧力の変化率 ［%］	排出流量 ［cm^3/s］	24時間後の 圧力の変化率 ［%］
10	9.7×10^{-5}	0.2	1.1×10^{-4}	0.3
30	1.0×10^{-2}	22.4	9.0×10^{-3}	20.4

4.1.2　理論式

（１）圧力降下が大きい場合の粘性流れの式（以降、「粘性流れの式」という）

損傷の形状を円管状と仮定し、以下の粘性流れの式を検討した。孔径が小さい場合、圧縮性流体においても圧力差が小さい局所的な部分についてはハーゲン・ポアズイユの式が適用できると考え、空気の粘性流れの式を導出した。なお、空気の流れは理想気体の等温流れと仮定した。

【式の導出】

温度が一定と仮定していることから P/ρ は一定となる（P と ρ は任意の圧力及び密度）。

$$\frac{P}{\rho}=\frac{P_1}{\rho_1} \quad \therefore \rho=\rho_1\frac{P}{P_1} \quad \cdots (7)$$

連続の式より、質量流量Wは流れ方向に一定であるとすると、(7)式と(5)式のハーゲン・ポアズイユの式より、

$$W=Q\rho=Q_1\rho_1=-\frac{\pi\rho_1}{128\mu}\cdot\frac{P}{P_1}\cdot D^4\cdot\frac{dP}{dL} \quad \cdots (8)$$

(8)式より以下の微分方程式が得られる。

$$-P\,dP=Q_1\frac{128\mu P_1}{\pi D^4}dL \quad \cdots (9)$$

(9)式について、P_1 から P_2 まで積分すると、以下を得る。

$$Q_1=\frac{\pi D^4 P_1}{256\mu L}\left(1-\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^2\right) \quad \cdots (10)$$

Q_1：空気の流量、D：ガラス管の孔径、μ：空気の粘性係数(20℃)、L：管の長さ、P_1：管の入口圧力、P_2：管の出口圧力

(10)式により得られる流量を以下の式より、Q_1 を大気圧下における流量に換算する。

$$Q_{atm} = Q_1 \times \frac{P_1}{P_{atm}} \quad ・・・(11)$$

（２）先細ノズルの式

損傷の形状をオリフィス状と仮定したときに、オリフィスとは管路のモデルが違うものの、管路の摩擦抵抗を含まない圧縮性流体の縮流を扱う流量の計算式である先細ノズルの式が概算での開口の評価に適用できると考える。なお、気体に対するオリフィス流量計の計算式については、膨張係数を算定するための圧力比が今回の使用条件では適用範囲の最小値未満であるため、採用しないこととした。

なお、先細ノズルの式とは、圧縮性流体の流れに対して適用する式であり、ゆるやかな断面変化のある管内の流れを各断面上の状態量は同一（等エントロピー：P/ρ^{κ}=const）とみなして、最小断面積であるノズルの出口から排出した流体の質量流量を算出する式である。

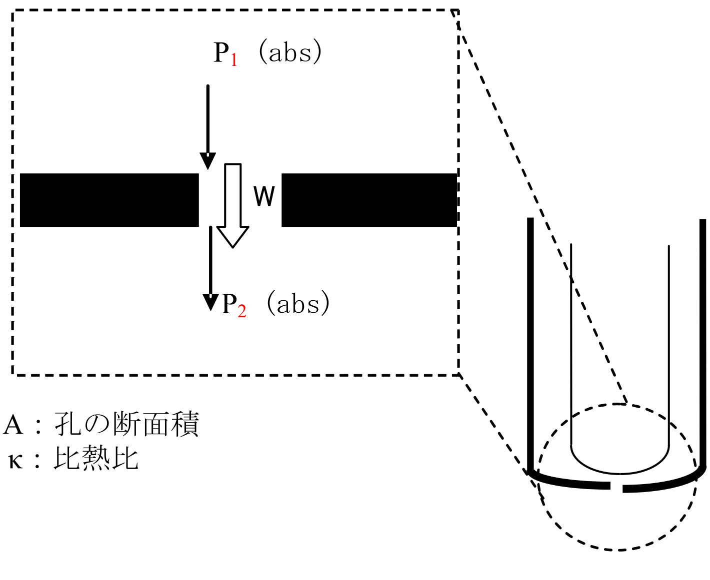


図１７　先細ノズルの概要図

$$W = A\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} P_1 \rho_1 \cdot \left\{1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right\}} \quad ・・・(12)$$

A：孔の断面積　ρ_1：P_1での密度　κ：空気の比熱比

ノズル出口が臨界圧力となった場合、P_2がこの臨界圧力未満になっても管路を流れる流体の質量流量は増加しない（閉塞流れ：出口マッハ数が 1）ので、圧力比に 0.53 を用いて質量流量を算定する。

なお、質量流量から、大気圧下における 20℃の体積流量への換算は以下の式のとおり。

$$Q_{atm} = \frac{W}{\rho_{atm}} \quad ・・・(13)$$

ρ_{atm}：20℃、大気圧での空気密度

4.1.3　試験結果と理論式の比較

（１）ビーカ試験（縦向き）と理論式（粘性流れの式）の比較

4.1.1 のビーカ試験（縦向き）において得られた結果（100μm においても試験を実施）と粘性流れの式で算出した結果を比較した結果を表１７に示す。

なお、先細ノズルの式については、試験を円管で行ったため比較を行っていない。

表１７　試験結果と粘性流れの式による流量の比較

入口圧力 [kPa (abs)]	出口圧力 [kPa (abs)]	ガラス管の孔径 [μm]	試験結果 [cm^3/s]	粘性流れの式による流量 [cm^3/s]	試験結果と理論式の差※9 [%]
156	101	10	9.7×10^{-5}	9.5×10^{-5}	2
		30	1.0×10^{-2}	7.7×10^{-3}	30
		100	0.72	0.95	-24

※９【試験結果と理論式の差】＝$\dfrac{（【試験結果】－【理論式での流出流量】）}{【理論式での流出流量】}$

表１７の比較の結果、孔径 10～100μm の範囲においては、若干のばらつきが見られているものの、粘性流れの式でほぼ一致した。

4.1.4　考察

孔径が約 10～100μm の範囲におけるばらつきは、流量が非常に小さいことによる測定誤差と考えられる。試験結果の流量から管路の流れが層流であること及び試験結果が孔径のほぼ４乗に比例していることから、粘性流れの式は円管状の管路を通じた流量を模擬できると考える。

4.1.5　実機への適用性

圧力降下確認を実施したが、有意な圧力の降下は見られなかった。圧力降下確認で評価できる損傷の開口の下限値を計算するために、24時間中に約10kPaの圧力降下があれば検知できる有意な降下とした。よって、加圧設備において、加圧圧力を201.3kPa（絶対圧力）、24時間後に 191.3kPa（絶対圧力）まで圧力降下する時の開口を、損傷の形状を円管状及びオリフィス状として再評価した。

また、損傷形状をオリフィス状と仮定した場合の開口については、上記条件を先細ノズルの式に代入し、開口を算定した

表１８　圧力降下が確認できる開口［μm]の比較

損傷の形状を円管状と仮定	損傷の形状をオリフィス状と仮定
粘性流れの式	先細ノズルの式
約20（21.2）	4（4.0）

開口の大きさは、評価上、10μm単位で扱った。()は計算値を示す。

4.2　今後の損傷の進展への適用性

損傷部の開口の進展を評価するために、ガラス管の孔径を変えた場合のビーカ試験及び実規模試験から得られる空気の排出流量が理論式で模擬できることを確認し、その理論式を用いて今後の進展評価に対する適用性を検討する。

4.2.1　確認試験

（１）ビーカ試験（縦向き）

4.1の圧力降下量の確認のために行った試験の装置（図１５　参照）を用いて、ガラス管の孔径を変えた場合の空気の排出流量を表１９のとおり確認した。

表１９　ビーカ試験（縦向き）の結果

入口圧力 [kPa（abs)]	出口圧力 [kPa（abs)]	ガラス管の 孔径 [μm]	試験 結果 [cm^3/s]
156	101	10	1.0×10^{-4}
		30	1.0×10^{-2}
		100	0.72
		150	2.4
		200	4.4
		250	8.1

（２）実規模試験

添付資料－３５の保護管への液の流入の有無を確認した実規模試験において計測した空気の排出流量は表２０のとおりであった。なお、10μmと30μmにおいては排出流量が小さく、実規模試験で用いた流量計では計測できなかった。

表２０　実規模試験の結果

加圧圧力 (入口圧力) [kPa（abs)]	濃縮缶側から の圧力 (出口圧力) [kPa（abs)]	孔径 [μm]	排出流量 [cm^3/s]
201	31	10	―
		30	―
		300	19.5
		1000	190.0

4.2.2　理論式

（１）粘性流れの式

4.1.2の（１）と同様の式。

（２）先細ノズルの式

4.1.2の（２）と同様の式。

4.2.3　試験結果と理論式の比較

（１）孔径と空気流量の関係

濃縮初期条件における孔径と空気流量との関係を図１８に示す。図１８は、保護管先端にかかる濃縮缶側からの圧力が最も小さく、保護管先端からの流量が最も大きくなる濃縮初期の条件下に換算した流量である。

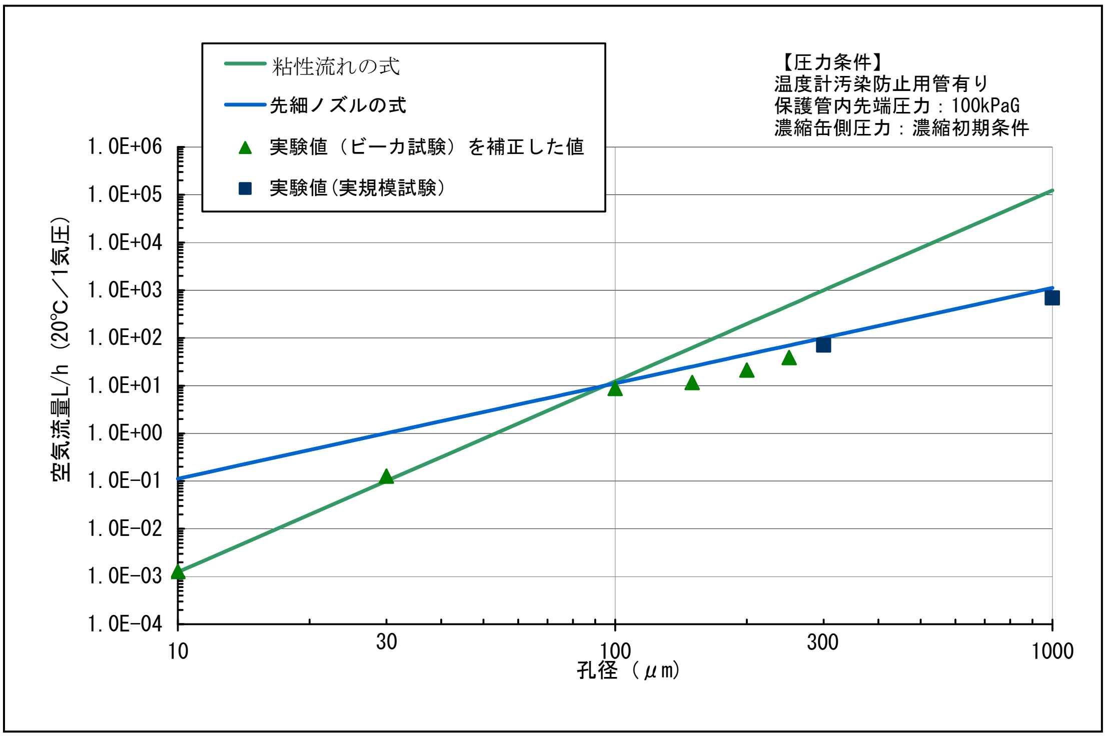


図１８　濃縮初期条件における孔径と空気流量の関係

試験での管路が円管の形状において、孔径が約 100μm 未満の範囲では、試験結果は孔径のほぼ４乗に比例し、粘性流れの式から算定した流量とほぼ一致した。孔径が約 100μm 以上の範囲では、試験結果は孔径のほぼ２乗に比例し、先細ノズルの式により算定した流量に漸近し、おおよその範囲で一致した。

（２）試験結果と理論式の比較

① 圧力降下が大きい場合の粘性流れの式について

4.1.3 で比較したとおりである。

② 先細ノズルの式について

a.　ビーカ試験（縦向き）

ビーカ試験（縦向き）での結果と先細ノズルの式から算定した流量を表２１に示す。

表２１　ビーカ試験の結果（補正値）と先細ノズルの式による流量の比較

入口圧力 [kPa (abs)]	出口圧力 [kPa (abs)]	ガラス管の孔径 [μm]	試験結果※１０ [L/h]	先細ノズルの式による流量 [L/h]	試験結果と理論式の差※１１[%]
201	31	10	1.3×10^{-3}	1.1×10^{-1}	99
		30	1.3×10^{-1}	1.0	87
		100	8.8	11.2	21
		150	11.6	25.1	54
		200	21.2	44.6	52
		250	38.6	69.7	45

※１０　10～100μｍ は粘性流れの式を使用し、試験結果を圧力差及びガラス管長さで補正した。150～250μｍは先細ノズルの式を使用し、試験結果を圧力比と密度で補正した。

※１１ $【試験結果と理論式の差】=\frac{(【理論式での流出流量】-【試験結果】)}{【理論式での流出流量】}$

10μｍ と 30μｍ では差が大きく、この範囲においては試験結果と先細ノズルの式での流量は一致しないが、100μｍ 以上の範囲では、先細ノズルでの流量は試験結果に対して若干大きい値を示しているものの試験結果に漸近する傾向を示した。なお、100μｍ以上の範囲においては、流量は孔径のおおよそ２乗に比例していることも確認した。

b. 実規模試験

実規模試験の結果と先細ノズルの式から算定した流量を表２２に示す。

表２２　実規模試験の結果と先細ノズルの式による流量の比較（単位換算値）

加圧圧力 (入口圧力) [kPa (abs)]	濃縮缶側からの圧力 (出口圧力) [kPa (abs)]	孔径 [μm]	試験結果 [L/h]	先細ノズルの式による流量 [L/h]	試験結果と理論式の差※１２ [%]
201	31	300	70.2	100.4	30
		1000	684	1115.2	39

$【試験結果と理論式の差】=\frac{(【理論式での流出流量】-【試験結果】)}{【理論式での流出流量】}$

※　１２

300μｍと1000μｍの範囲において、先細ノズルでの流量は試験結果に対して若干大きい値を示しているが、a.の傾向と同様の傾向を得た。なお、この範囲においても、孔径は流量のおおよそ２乗に比例していることを確認した。

4.2.4　考察

（１）圧力降下が大きい場合の粘性流れの式について

孔径が約100μｍ未満の範囲においては、4.1.4の考察と同様である。一方、孔径が約100μｍ以上の範囲においては、試験結果である流量が孔径のほぼ２乗に比例していることから粘性流れの式から算定した流量と試験結果で差異が大きくなった（図１８　参照）。

（２）先細ノズルの式について

先細ノズルの式は損傷の形状がオリフィス状であるとの仮定のもとに流量の算定に適用するもので、円管状の管路での試験結果と比較するものではない。しかしながら、孔径が約100μｍ以上の範囲での試験結果は孔径のほぼ２乗（断面積）に比例しており、先細ノズルの式から算定した流量に漸近していった。よって、試験結果と先細ノズルの式での流量の差を考慮した流量の補正を行えば、円管状の管路を通じた流量においても、約100μｍ以上では先細ノズルの式で概算として説明できると考える。一方、約100μｍ未満の範囲でも、損傷の開口の形状がオリフィス状の場合は、流量が円管状に比べて大きくなり、先細ノズルの傾向を示すと考えられる。

（３）閉塞流れの状態

添付資料－３５の実規模試験により採取したデータを閉塞流れの状態を示す観点から整理したものを図１９に示す。

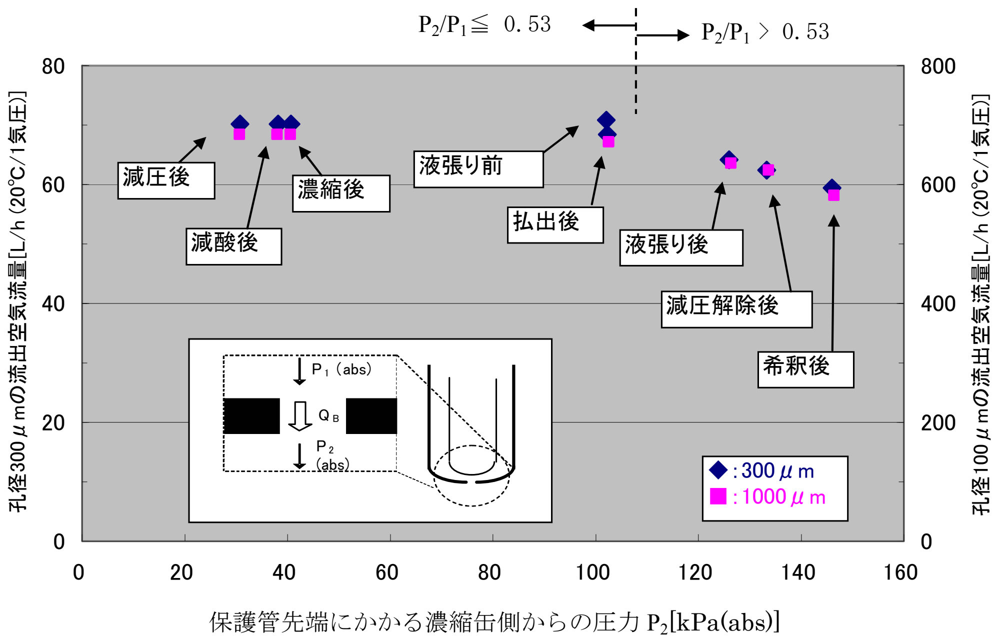


図１９　保護管先端にかかる濃縮缶側からの圧力と孔径 300μm, 1000μm の流出空気流量との関係

損傷部位前後の圧力比が 0.53 以下である場合、保護管先端での空気は閉塞流れの状態であり、保護管先端にかかる濃縮缶側からの圧力の変化によらず、流量に変化はなかった（閉塞流れ）。

4.2.5　実機への適用性

上記の検討結果より、実機に設置する加圧方式の流量計の指示値から、進展した損傷部の開口の大きさを以下の方法で定期的に算定することで、損傷の進展の評価を行うことができる。

（1）流量が小さい場合

孔径と流量の関係から、粘性流れの式と先細ノズルの式が交差する点の流量未満（図１８の例でいうと交差する点の流量は約 10 L/h[normal]である）であれば、以下の二通りの式から、流量計の指示値を用いて、開口の大きさの範囲を算定する。

- 円管状での開口の大きさ評価として粘性流れの式を用いる。
- オリフィス状での開口の大きさ評価として先細ノズルの式を用いる。

（2）流量が大きい場合

孔径と流量の関係から、粘性流れの式と先細ノズルの式が交差する点の流量以上であれば、円管状の損傷であったとしても、円管状の管路での試験結果が先細ノズルの式から算定した流量に漸近するので、先細ノ

ズルの式のみを用いて、開口の大きさを算定する。

なお､先細ノズルの式に代入する流量については以下のとおりであり､算定される開口の大きさは範囲をもつ。

- 円管状での開口の大きさ評価として用いる流量は、円管状の管路を用いた試験での流量が先細ノズルの式での流量に対して小さくなる結果を得ており、流量計の指示値を用いると先細ノズルの式からの開口は小さくなるので、その試験結果との差異を考慮して、流量計の指示値を補正した値とする。
- オリフィス状での開口の大きさ評価として用いる流量は、先細ノズルの式がそもそもオリフィス状での開口を想定して採用した式であるので、流量計の指示値とする。

５．総合評価

保護管に高レベル廃液が浸入したことに対しては、以下のとおり評価できる。

5.1 液体に係る評価

（１）毛細管現象

毛細管現象により損傷部位内の液が上昇する。また、損傷部位を超えて保護管内に液が浸入すると、毛細管が水没し、毛細管現象による液上昇がなくなる。

（２）損傷方向

ガラス管を縦向きと横向きにセットした場合での流量の差はほぼ同等とみなせることから、損傷が保護管の下部及び側面にあった場合でも、液の流入流量に大きな違いは見られない。

なお、水中でガラス管を空気により加圧することで、液がガラス管内へ流入しないことを確認した。

（３）損傷部位における液浸入の流量

３．の結果より、流路が狭いほど、保護管内への液浸入の流量は小さくなる（孔径の４乗に比例して、液浸入の流量が低下する）。また、濃縮缶側からの圧力と保護管側からの圧力の差が小さいほど、保護管内への液浸入の流量は小さくなり、その圧力差にほぼ比例して液浸入の流量が低下した。

（４）液浸入と損傷の大きさの関係

約 7cm^3の液が保護管内に浸入した際の液浸入に要する時間から開口の大きさを評価した結果、100 時間の場合では損傷部の開口が 2～24μｍ、500 時間の場合では開口が 1～16μｍ、 5000 時間の場合では開口が 0.3～9μｍという計算結果であった。

また、保護管内の液拭取り後に保護管内に浸入した液量から損傷の大きさを評価した結果、2〜40μｍ程度という計算結果であった。

5.2 気体に係る評価

（１）圧力降下と損傷の大きさの関係

孔径が30μｍの場合には、100kPa加圧下における24時間後の圧力降下率が20.4〜22.4%となり、有意な圧力降下が生じた。一方、孔径が10μｍの場合には、100kPa加圧下における24時間後の圧力降下率が0.2〜0.3%となり、圧力降下は検知できなかった。また、粘性流れの式、及び先細ノズルの式から評価した圧力降下が確認できる開口は、損傷の形状を円管状と仮定した場合は約20μｍ程度、損傷の形状をオリフィス状と仮定した場合は約4μｍ程度であった。

5.3 現状の損傷の程度

5.1及び5.2の評価結果より、損傷の形状を円管状と仮定した場合、ハーゲン・ポアズイユの式及び粘性流れの式から約30μｍ程度であり、損傷の形状をオリフィス状と仮定した場合、オリフィスの式及び先細ノズルの式より、約5μｍ未満であった。よって、現状の損傷の程度として、開口の大きさは約30μｍ以下と考えられる。

5.4 今後の損傷の進展に係る評価方法

4.2.5の検討結果より、実機に設置する加圧方式の流量計の指示値から、進展した損傷部の開口の大きさを以下の式を用いて定期的に算定することで、損傷の進展の評価を行うことができる。

（１）　流量が小さい場合

孔径と流量の関係から、粘性流れの式と先細ノズルの式が交差する点の流量未満であれば、以下の式を用いる。

- ・ 損傷の形状を円管状と仮定した場合は粘性流れの式。
- ・ 損傷の形状をオリフィスと仮定した場合は先細ノズルの式。

（２）　流量が大きい場合

（１）の流量以上であれば、先細ノズルの式を用いる。なお、先細ノズルの式に代入する流量については以下のとおりである。

- ・ 損傷の形状を円管状と仮定した場合は、円管状の試験結果と先細ノズルの式からの流量の差を考慮して、流量計の指示値を補正。
- ・ 損傷の形状をオリフィスと仮定した場合は、流量計の指示値。

廃液浸漬による温度計表面の変化の評価

温度計現品の外観観察及び表面観察の評価並びに保護管内への液の浸入時期の評価を行うにあたり、温度計表面が高レベル廃液と接することによりどのように変化するかを確認するため、以下の条件で廃液浸漬試験を実施した。

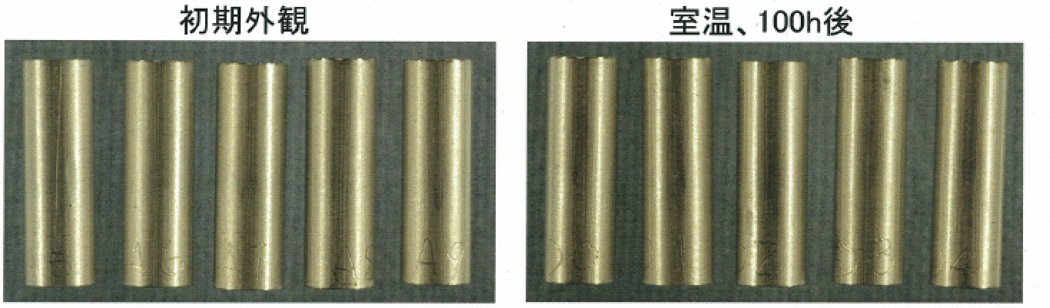
○試験片：SUS316（温度計シースの材質）

○試験液：保護管内への漏えいが確認された時点で、濃縮缶内に保有していた液の性状を模擬
（酸濃度：4.3 mol/L、濃縮度：高レベル濃縮廃液の約 1/10 の FP 濃度）

○試験温度：室温及び 55℃（濃縮缶加熱運転中の温度を模擬）の２ケース

○試験時間：100 時間

観察結果を図１、図２に示す。



試験片を模擬廃液に室温及び 55℃で 100 時間浸漬した結果、室温では外観の変化は見られなかったが、55℃では試験片が茶褐色に変色した。

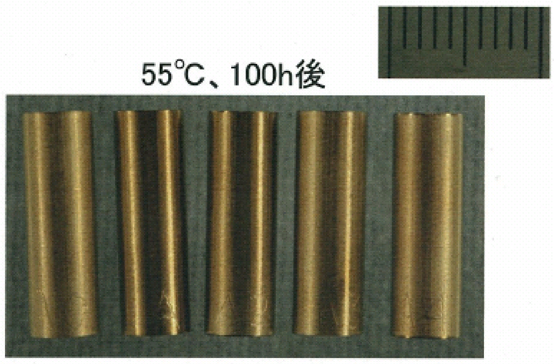
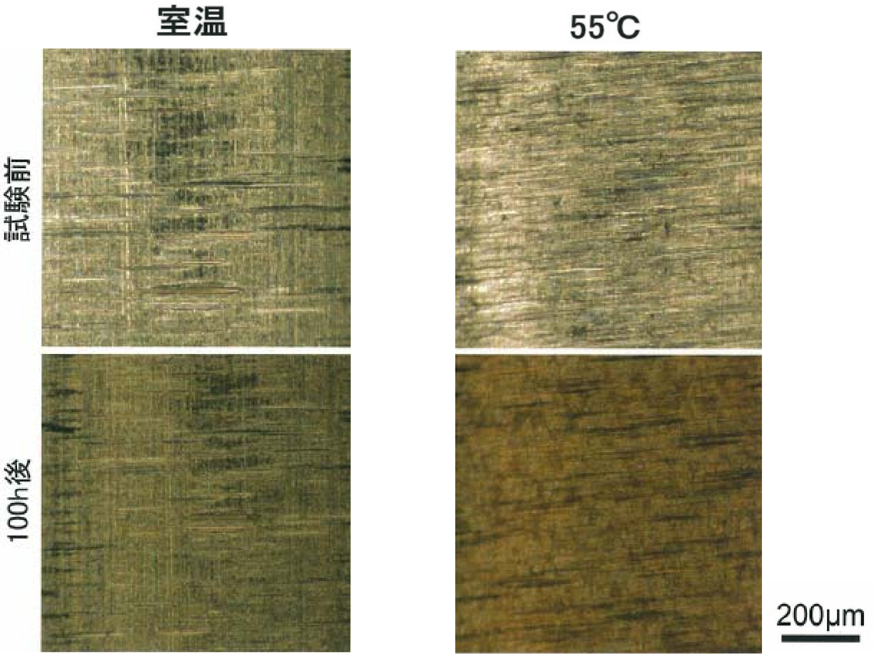


図１　廃液浸漬試験の結果（外観観察）



模擬廃液中に室温で 100 時間浸漬した結果、試験片に変色や腐食痕は認められなかった。
（写真における色の違いは、撮影時におけるコントラストの違いによるもの）

模擬廃液中に 55℃で 100 時間浸漬した結果、試験片が茶褐色に変色し、試験片上の一部で腐食痕が認められた。

図２　廃液浸漬試験結果（マイクロスコープ観察）

図１、図２に見られるように、浸漬から 100 時間後において、室温のケースでは外観及び表面に変化は見られなかったが、55℃のケースでは試験片が茶褐色に変色し、表面観察において一部で腐食痕が認められる結果が得られた。

仏国ラ・アーグ再処理施設、英国セラフィールド再処理施設における温度計に係る類似事象

工　場	発生年	施　設	設　備	発生事象の概要	原　因
仏国 ラ・アーグ 再処理施設	1993	UP3	中間ウラン濃縮缶	保護管への漏えい発生	推定：保護管先端部のトンネル腐食
	1997				
	1997	UP3	不溶解残渣廃液貯槽	保護管への漏えい発生	推定：機械的疲労
	2000	UP2-400	中レベル放射性廃液蒸発缶	保護管への漏えい発生	推定：保護管先端部のトンネル腐食
	2005	UP2-800	酸回収蒸発缶	保護管への漏えい発生	推定：保護管先端部のトンネル腐食
	2006	UP2-400	濃縮廃液貯槽	保護管への漏えい発生	推定：保護管先端部のトンネル腐食
英国 セラフィールド再処理施設	2005	―	溶解槽	温度計交換時における作業者の汚染	推定：保護管溶接部の局部腐食

要因分析図

事象	要因1	要因2	要因3	要因4	調査内容	検討・評価	
濃縮缶内の保護管内への高レベル廃液の漏えい	A 設計	A-1 保護管の腐食防止のための材料選定	A-1-1 シームレス管の材料選定		図面調査 文献調査	第2回設工認申請書に記載されている「六ヶ所再処理施設の材料選定フロー」に基づき、耐食性に優れた極低炭素ステンレス鋼であるR-SUS304ULCを採用していることを確認した。 また、核分裂生成物を含む硝酸中において、ステンレス鋼の腐食は粒界腐食による脱粒を伴う全面腐食として進行し、局部的に進行することはないこと[1]、ステンレス鋼の耐食性を高めているCrと溶接時に結合して耐食性を低下させる要因となる炭素量が十分に少ない材料においては、SCCの発生や局部腐食の要因となる[2]溶接時の熱影響による鋭敏化が起こりにくいこと[3]を文献により確認した。	×
			A-1-2 溶接金属の材料選定		図面調査 文献調査	第2回設工認申請書に記載されている「六ヶ所再処理施設の材料選定フロー」及び核燃料施設の技術基準に基づき、耐食性に優れた極低炭素ステンレス鋼であるRY308ULCを採用していることを確認した。 また、核分裂生成物を含む硝酸中において、ステンレス鋼の腐食は粒界腐食による脱粒を伴う全面腐食として進行し、局部的に進行することはないこと[1]を文献により確認した。	×
			A-1-3 キャップの材料選定		図面調査 文献調査	第2回設工認申請書に記載されている「六ヶ所再処理施設の材料選定フロー」に基づき、耐食性に優れた極低炭素ステンレス鋼であるR-SUSF304ULCを採用しており、さらにトンネル腐食の発生防止対策としてESR処理を施していることを確認した。 また、核分裂生成物を含む硝酸中において、ステンレス鋼の腐食は粒界腐食による脱粒を伴う全面腐食として進行し、局部的に進行することはないこと[1]、ステンレス鋼の耐食性を高めているCrと溶接時に結合して耐食性を低下させる要因となる炭素量が十分に少ない材料においては、SCCの発生や局部腐食の要因となる[2]溶接時の熱影響による鋭敏化が起こりにくいこと[3]を文献により確認した。	×
		A-2 保護管の機械的損傷（割れ）に対する考慮			図面調査 応力評価	濃縮缶の内部及び外部から保護管及びサポート溶接部に受ける負荷として保護管の内圧による応力、外荷重（地震、対流）による応力、運転時の熱応力が考えられる。 これらの応力を算出したところ、保護管及びサポート溶接部にかかる応力はいずれも許容応力より十分小さく、また、運転中の繰り返し応力を考慮しても疲労限度より十分小さいことを確認した。	×
		A-3 保護管の磨耗に対する考慮	A-3-1 保護管と濃縮缶内の他構成部品との接触に対する考慮		図面調査	保護管はサポートにより溶接固定され、濃縮缶内の他の構成部品と接触しない設計としていることを設計図書により確認した。	×
			A-3-2 廃液中の固形分との接触（エロージョン）に対する考慮		文献調査	濃縮缶は物理的なかくはんを行っていないことから、加熱による熱流動を考慮すると流速は1 m/s以下と考えられ、それに対して一般論として流速が6 m/s以下ではエロージョンは問題とならないということを文献により確認した。また、今回の事象を受け、他の文献調査を行い、スラリーを含む水を用いた試験で3 m/sまでの流速でエロージョン速度が小さいという結果が得られていることを確認した。	×
		A-4 保護管の腐食に対する考慮	A-4-1 肉厚の設定に対する考慮（シームレス管、キャップ）		図面調査	第４回設工認申請書に記載されている「腐食代に関する設計の基本方針」に基づき設計腐食速度から腐食代（1.0 mm）が算出されていること、耐圧強度上必要な厚さに腐食代及び余裕代を加味した肉厚（6.4 mm）に設定されていることを設計図書により確認した。 また、設計当時の腐食速度を設定する際の前提となる腐食試験において、高レベル廃液に、腐食影響成分として代表的なものと考えていた鉄について、先行施設の実績をもとに設定した量を添加した条件での腐食速度等の評価を行っていることを確認した。 その後、平成１４年からネプツニウムの効果を考慮に入れ、当社再処理工場の高レベル濃縮廃液を模擬した試験液を用いて腐食試験を実施し、その腐食速度が設計当事に想定したよりも増加することが確認された。	△
			A-4-2 すき間腐食に対する考慮（溶接部）		図面調査	キャップとシームレス管は突合せ溶接、シームレス管とサポートは全周隅肉溶接として、すき間腐食の発生の要因となるすき間構造を排除していることを設計図面により確認した。	×
			A-4-3 電食に対する考慮（温度計シースと測定素子の接触部）		図面調査	温度計の測定素子（白金抵抗素子及びリード線）は絶縁体のMgOで絶縁された構造のものを採用し、温度計のシースと測定素子の間の絶縁性を確保していることを設計図面により確認した。	×
	B 製作・施工不良	B-1 製作不良	B-1-1 シームレス管の不良	B-1-1-1 シームレス管の材料不良	製造履歴調査	材料確認記録により設計どおりの材料を使用していること、検査証明書により規定の65%硝酸腐食試験に合格している耐食性に優れた材料であること、材料の化学成分が規格範囲内であること、引張試験の結果により機械的性質が規定の範囲内であることを確認した。	×
				B-1-1-2 シームレス管の製作不良	製造履歴調査	シームレス管の製作時に外観検査、UTに合格し有意な欠陥がないことを、検査証明書により確認した。	×
			B-1-2 キャップの不良	B-1-2-1 キャップの材料不良	製造履歴調査	材料確認記録により設計どおりの材料を使用していること、材料試験成績書により規定の65%硝酸腐食試験に合格している耐食性に優れた材料であること、材料の化学成分が規格範囲内であること、引張試験の結果により機械的性質が規定の範囲内であることを確認した。また、UT・PTに合格し有意な欠陥がないこと及びESR処理を行っていることを確認した。	×
				B-1-2-2 キャップの加工不良	製造履歴調査	キャップの加工時に寸法検査を行い規定の寸法範囲内であること、外観検査、UT、PTに合格していることを検査成績表により確認した。	×
			B-1-3 溶接部の不良	B-1-3-1 溶接金属の材料不良	製造履歴調査	材料確認記録により当該材料が設計どおりの材料を使用していること、材料証明書により規定の65%硝酸腐食試験に合格していること、材料の化学成分が規格範囲内であること、引張試験の結果により機械的性質が規定の範囲内であることを確認した。	×
				B-1-3-2 シームレス管とキャップの溶接不良	溶接記録調査 製造履歴調査	シームレス管とキャップの溶接箇所について、放射線透過試験成績書及び浸透探傷試験記録によりRT、PTに合格していること、RTのフィルムにより欠陥がないことを確認した。また、耐圧・漏えい試験記録により耐圧、漏えい検査に合格していること、仕上がり検査記録により形状寸法、溶接部外観が溶接の技術基準に適合していることを確認した。	×
			B-1-4 温度計の不良		製造履歴調査	取扱説明書により、温度計は絶縁された構造のものであること、試験成績書により温度計のシースと測定素子の間に設計どおりの絶縁性が確保されていることを確認するための絶縁抵抗試験に合格していることを確認した。	×
		B-2 施工不良			溶接記録調査 製造履歴調査	保護管とサポートの溶接箇所について、すき間構造を排除した適切な溶接施工を行っており、PTに合格していることを溶接作業記録票及び浸透探傷試験記録により確認した。また、漏えい・変形がなく設計どおりの施工となっていることを耐圧・漏えい試験記録及び仕上り検査記録により確認した。	×
		B-3 据付不良等	B-3-1 輸送中における損傷		据付記録調査	耐圧・漏えい試験成績書により、据付後の耐圧・漏えい検査に合格していることを確認した。	×
			B-3-2 据付時における損傷		据付記録調査	耐圧・漏えい試験成績書により、据付後の耐圧・漏えい検査に合格していることを確認した。	×
			B-3-3 保護管内への温度計の設置不良（摺動の発生）		据付記録調査	温度計据付チェックシートにより温度計の長さ及び保護管の長さ、温度計挿入後の絶縁抵抗に問題がないことを確認した。	×
	C 使用環境	C-1 濃縮缶内の機械的負荷	C-1-1 温度上昇による保護管とサポート溶接部の損傷		熱応力解析	濃縮缶下部の温度上昇が発生した場合に、その温度差によって発生する熱応力を解析により算出した結果、最大応力の発生箇所は保護管の先端サポート溶接部であり、その応力に地震・対流等により発生する応力を組み合わせても、疲労限度より十分小さいことを確認した。	×
		C-2 濃縮缶内の磨耗影響	C-2-1 廃液中の固形分との接触によるエロージョン		熱流動解析結果調査	実運転条件を模擬した熱流動解析の結果から、最大の流速の場合でも、文献で示されているエロージョンの発生する流速の領域よりも十分に小さい値であることを確認した。	×
		C-3 濃縮缶内の腐食影響	C-3-1 濃縮缶内における腐食影響成分の影響	C-3-1-1 酸化性イオンによる全面腐食（シームレス管、溶接部、キャップ）	腐食量評価 現場調査	保護管底部の残肉厚確認により当該保護管は肉厚が設計値を下回っていたものの、損傷に至るような状態ではないことから、全面腐食によって保護管が損傷した可能性はない。 なお、保護管と同等の環境にある加熱コイルの肉厚をアクティブ試験において測定した結果、減肉量は0.1～0.2 mm程度であった。	×
				C-3-1-2 酸化性イオンによるトンネル腐食（局部腐食）（キャップ）	文献調査	腐食影響成分であるネプツニウムを考慮し、アクティブ試験の濃度実績からその腐食速度を評価すると0.04 mm/年程度となり、過不動態領域には到達しないことから、設計時に実施した腐食試験において評価した腐食性よりも腐食速度は増加しているものの、ネプツニウムの影響でトンネル腐食が発生した可能性はない。	×
				C-3-1-3 塩素イオンの存在による孔食（局部腐食）（シームレス管、溶接部、キャップ）	文献調査	硝酸イオン濃度がある濃度以上になると孔食に対して腐食を抑制する作用があるため、塩素イオンの有無に関わらず孔食が発生しないことを文献[4]により確認した。	×
				C-3-1-4 塩素イオンの存在によるSCC（シームレス管、溶接部、キャップ）	文献調査	濃縮廃液中の塩素イオン濃度について分析実績はないものの、塩素イオンが多量に存在した場合でも、硝酸環境中では粒界腐食が支配的でSCCは発生しないことを文献により確認した。	×
				C-3-1-5 濃縮缶内の析出物の存在による全面腐食及び孔食（局部腐食）（シームレス管、溶接部、キャップ）	試験評価	析出物共存下の模擬廃液中での腐食試験において、全面腐食の腐食速度は析出物の有無によってほとんど変化しないこと、孔食等の局部腐食は認められなかったことを試験評価により確認した。	×
			C-3-2 濃縮缶内における温度による腐食影響	C-3-2-1 温度による全面腐食（シームレス管、溶接部、キャップ）	腐食量評価 現場調査	設計腐食速度に対して温度上昇の効果等を考慮した腐食量を算出しても約0.2 mmであり、保護管底部の残肉厚確認により当該保護管は肉厚が設計値を下回っていたものの、損傷に至るような状態ではないことから、全面腐食によって保護管が損傷した可能性はない。 なお、保護管と同等の環境にある加熱コイルの肉厚をアクティブ試験において測定した結果、減肉量は0.1～0.2 mm程度であった。	×
				C-3-2-2 温度によるトンネル腐食（局部腐食）（キャップ）	文献調査	アクティブ試験時において濃縮缶下部温度上昇が発生したことを踏まえ、腐食速度に対する評価を実施した結果、温度上昇が発生した際の腐食速度が0.1mm/年を上回ることを確認した。	○
				C-3-2-3 温度による溶接部における貫通欠陥の発生	文献調査 現場調査	保護管の材料であるR-SUS304ULCの溶接部については、規定の65%沸騰硝酸試験の結果、母材と同等の耐食性であることが示されており、今回の濃縮缶下部で見られたように温度が上昇しても、鋭敏化により溶接部が優先的に腐食し貫通に至ることはない。 また、保護管内の漏えい痕跡確認でキャップ溶接線及び上下のシーニング加工部に液垂れの痕跡が確認されなかった。なお、液垂れ確認の模擬試験で、キャップ溶接線付近から液が浸入した場合には液垂れの痕跡が残り、ビデオスコープによる観察で判別できる程度であることを確認している。以上より、貫通欠陥が溶接部にある可能性は低い。	×

凡例　○　要因として確認できたもの
　　　△　直接の要因ではないが、事象の発生を誘発した可能性のあるもの
　　　×　要因ではないことを確認できたもの

1) 広瀬他、日本原子力学会「1994秋の大会」J70(1994)70
2) 明石他、防食技術、30(1981)559-564
3) 安保他、原子力工業、38(1992)33-50
4) 腐食・防食ハンドブック

温度計保護管の機械的損傷に対する考慮の評価

１．機械的損傷に対する考慮について

濃縮缶の設計時、その小型内部構造品である保護管に対しては、耐圧設計として、耐圧強度上必要な寸法に腐食代及び製作上の公差等を見込んだ裕度を加えて板厚寸法を設定した。また、耐震設計として、保護管が配管であることから、地震時に発生する応力が許容値を十分下回るよう配管の支持間隔を設定して剛構造となるよう設計した。これらにより、保護管の機械的損傷に対して十分余裕を見込んだ構造としている。

しかしながら、今回保護管に漏えいが発生したことから、保護管にかかる応力を算出し、機械的損傷に至った可能性について評価を実施した。

２．荷重条件の設定

濃縮缶の内部及び外部から保護管及びサポート溶接部（図１　参照）に受ける荷重として、以下の項目が考えられる。

① 保護管の内圧による応力
② 外荷重による応力（図２　参照）
- 地震
- 対流

③ 運転時の熱応力

これらを考慮し、濃縮缶の通常運転状態において生じる応力を組み合わせて評価した。なお、濃縮缶がセルに設置されており外力を与えるような機器等が存在しないこと、濃縮缶内には機械的な駆動部がないことから、この他に外力を与える要素はない。

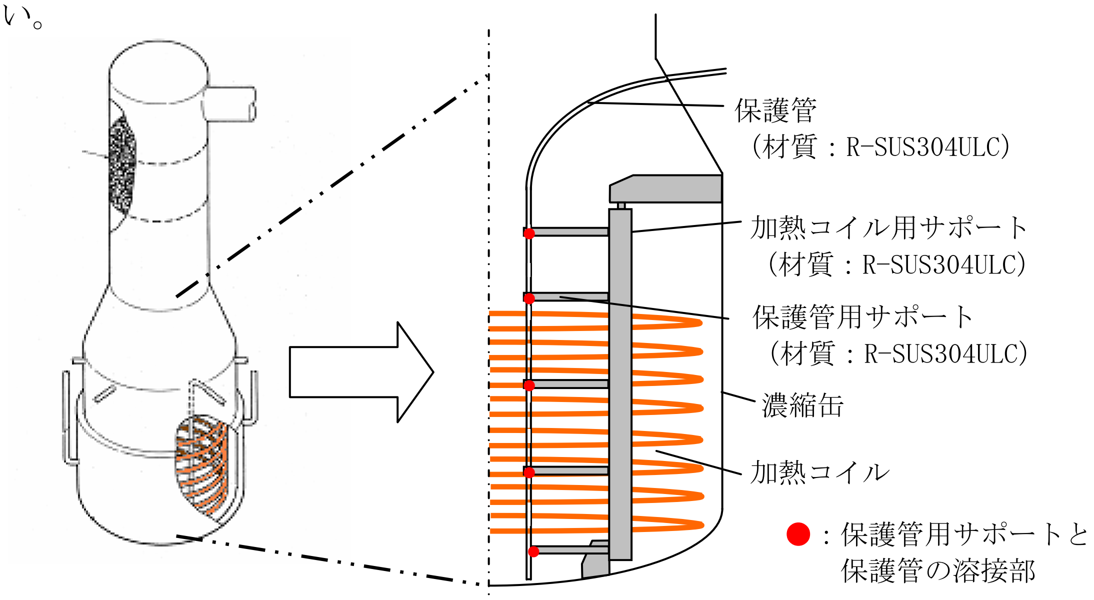


図１　濃縮缶内の保護管、サポート概要

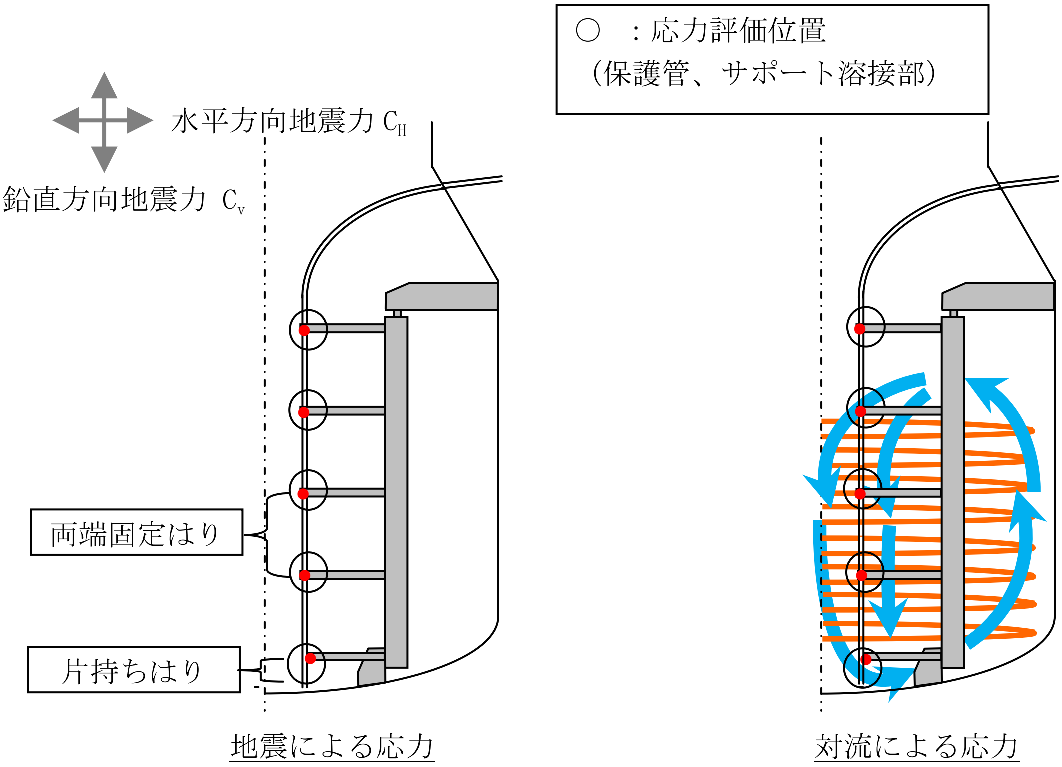


図２　外荷重による応力の概要

３．保護管の内圧による応力の評価

保護管の内側はほぼ大気圧であり、濃縮缶内は設計上絶対真空の減圧下で運転を行うことから、保護管の内圧として大気圧を考慮する。

４．外荷重による応力の評価

（１）地震による荷重

地震力として水平方向と鉛直方向を考慮し、それぞれの荷重について評価した。地震力の設定としては、濃縮缶が設置されている箇所の基準地震動$Ｓ_1$(設計用最強地震により定まる地震力または静的地震力)、$Ｓ_2$(設計用限界地震により定まる地震力)のうち、水平方向及び鉛直方向ともに最も大きいものを採用した。

（２）対流による流体力

濃縮缶の加熱コイル及び加熱ジャケットからの入熱によって、濃縮缶内の廃液には対流が起きる。このため、保護管とサポート溶接部には流体力が働く。

保護管まわりの流れの状況は、三次元熱流動解析結果（添付資料－２２　別紙参照）より図２のとおりである。

保護管に作用する流体力は、噴流が静止平板に当たった際に作用する力として、運動量保存の法則により求められる。

保護管及びサポート溶接部に作用する流体力：Ｆ

$$F = \rho Q v$$

［出典：機械工学便覧 流体工学　壁面に衝突する噴流による力］

ここで

ρ：廃液の密度

Ｑ：流量（＝ｖ(流速)×Ａ（投影面積））

ｖ：濃縮缶内の流速

（0.5ｍ/s：熱流動解析から得られた中央部付近の最大流速（0.21ｍ/s）から、評価部位近傍での対流のばらつきを考慮した保守的な評価として設定）

（３）評価モデル及び発生応力の評価方法

図３に保護管とサポートの取り付け詳細を示す。先端サポート部（Ｂ－Ｂ断面）は、２本の保護管用サポートが保護管に直接溶接固定されている。また、下から２番目のサポート部（Ａ－Ａ断面）は、保護管に溶接されたブレースに保護管と２本の保護管用サポートが溶接固定されている。より厳しい評価として、これらを、保護管用サポートを１本としてサポート溶接部で完全固定される「片持ちはり」及び「両端固定はり」にモデル化した。また、保護管用サポートについても「両端固定はり」にモデル化した（図３　参照）。

地震及び対流によって保護管とサポート溶接部に発生するせん断応力、曲げ応力及び圧縮/引張応力（図４、図５　参照）を算出し、それらを組み合わせて評価した。なお、保護管の圧縮/引張応力の算出の際には、地震による荷重に自重による荷重を加えて評価した。

５．運転時の熱応力の評価

運転中における温度変化によって保護管に熱応力が生じることが想定される。しかしながら、通常運転時においては濃縮缶内部の対流により溶液温度がほぼ均一となるよう設計されている。また、保護管、サポート及び濃縮缶本体を同一材質（R-SUS304ULC）としており、同じ線膨張係数を有していることから、温度差により大きな応力が発生しない設計としている。

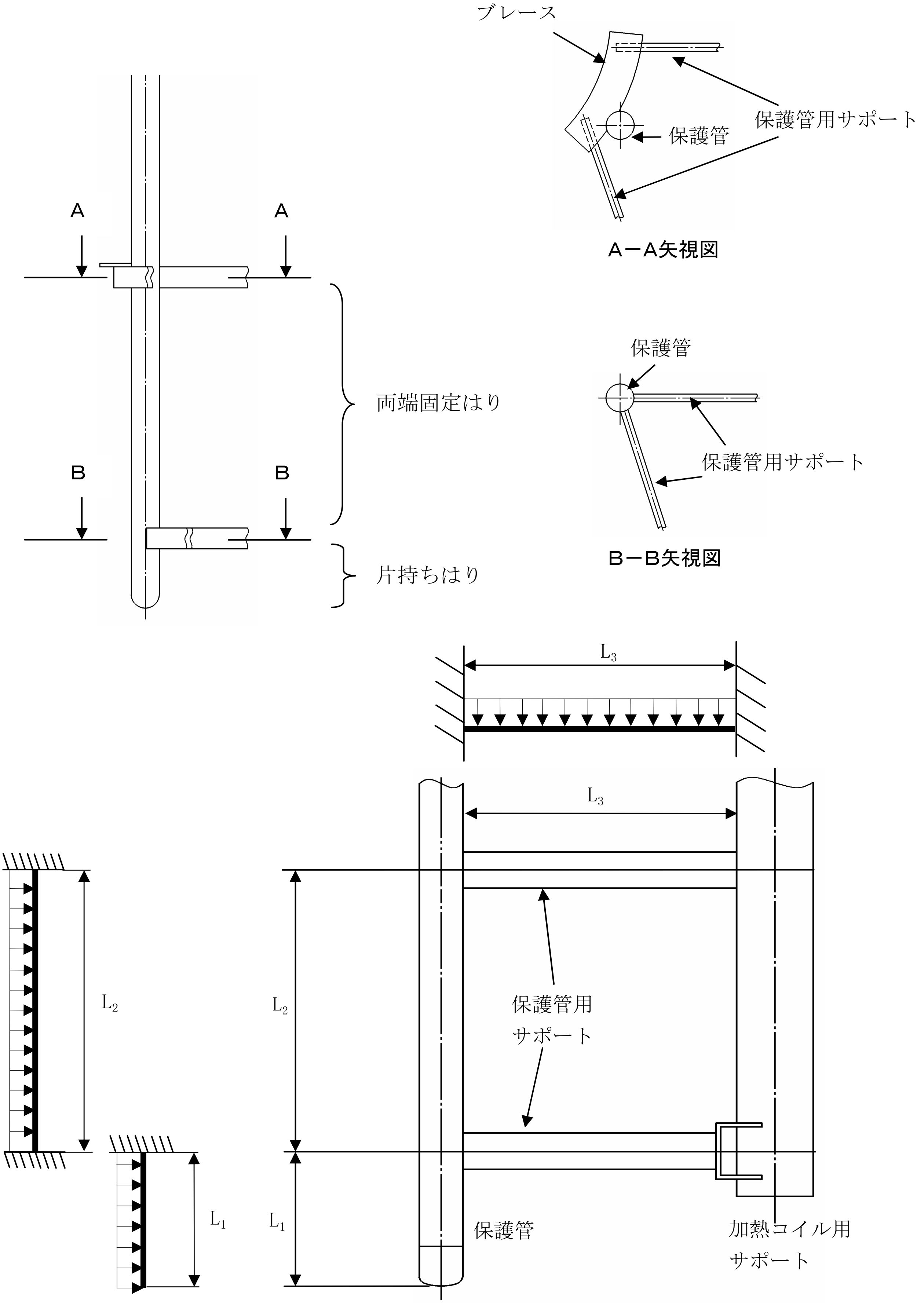


図３　保護管とサポートの取り付け詳細及びモデル化

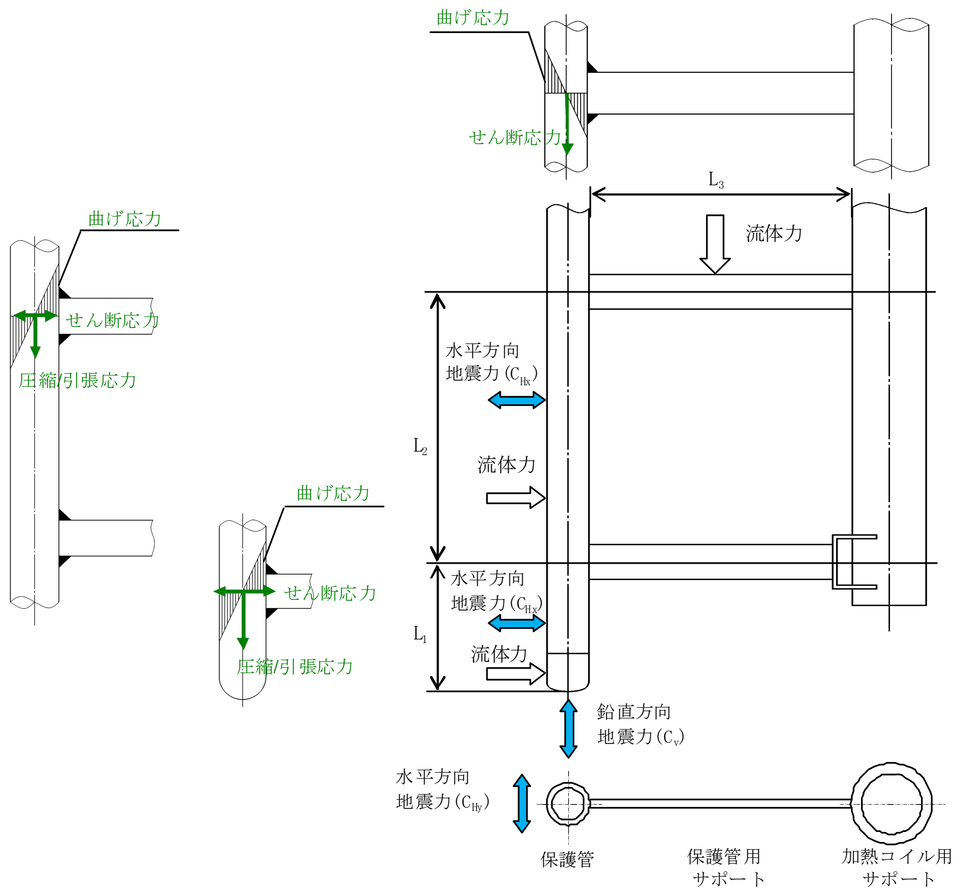


図４　保護管に作用する内圧、外荷重（地震、対流）による発生応力

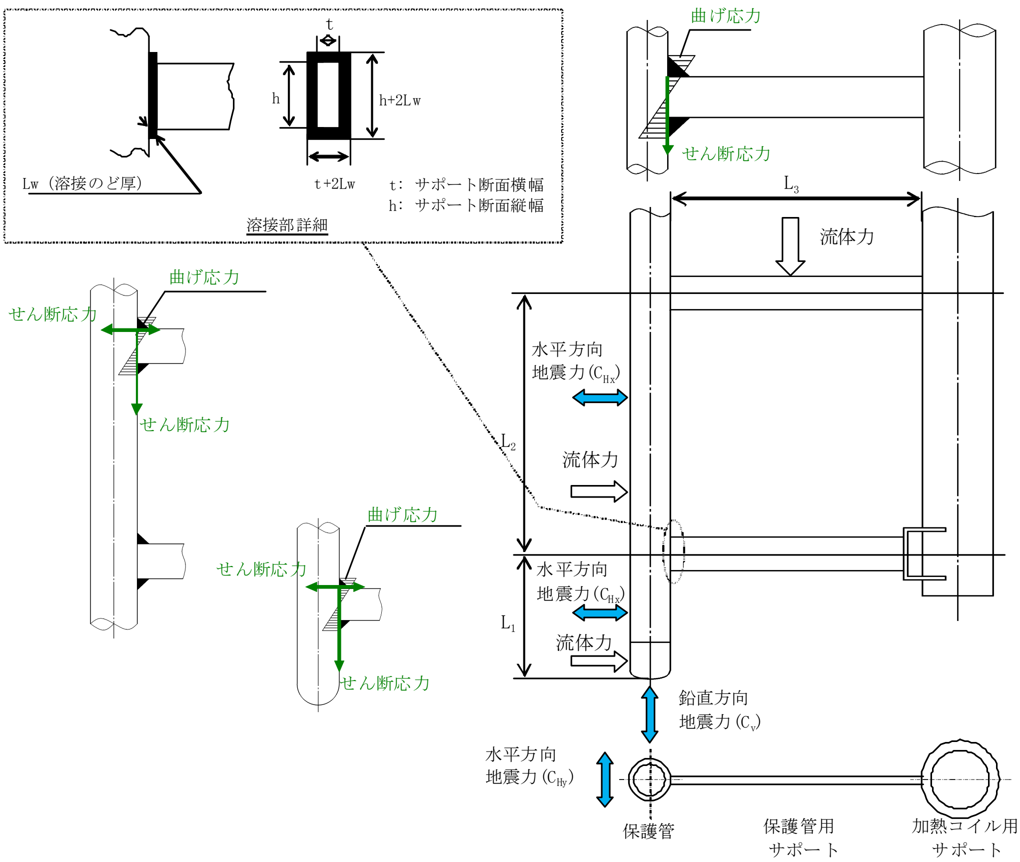


図５　サポート溶接部に作用する外荷重（地震、対流）による発生応力

６．発生応力による機械的損傷の可能性評価

保護管の内圧、外荷重（地震、対流）により生じるせん断応力、曲げ応力及び圧縮/引張応力を組み合わせて評価した値を下表に示す。

		応力値 (MPa)		許容応力 (MPa)	根拠
保護管	片持ちはり	P_m	1	99	S ※1
		P_L+P_b	4	99	S
	両端固定はり	P_m	1	99	S
		P_L+P_b	5	99	S
サポート溶接部	片持ちはり	組合せ	2	117	ft ※2
	両端固定はり	組合せ	5	117	ft

※1 保護管の許容応力［R-SUS304ULC, 100℃］

発電用原子力設備規格 設計・建設規格（JSME S NC1-2005）クラス１容器の許容応力とする。ただし、設計応力強さ（Sm）を使用せず保守的に許容引張応力（S）とし、供用状態のうち最も許容応力の小さい値を使用する。

P_m：一次一般膜応力

P_L＋P_b：一次曲げ応力

※2 サポート溶接部の許容応力[R-SUS304ULC, 100℃]

発電用原子力設備規格 設計・建設規格（JSME S NC1-2005）クラス１支持構造物の設計より、供用状態のうち最も許容応力が小さい値を使用する。

ft：許容引張応力

以上から、保護管及びサポート溶接部にかかる応力はいずれも許容応力より十分小さい。また、運転中の繰り返し応力を考慮しても疲労限度[1)] 約 114 MPa より十分小さいことから、機械的損傷に至った可能性はない。

1) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格（JSME S NC1-2005）PVB-3315 図 添付 4-2-2(1)

添付資料－２２

温度計保護管の磨耗に対する考慮及び
析出物との接触によるエロージョンに対する評価

エロージョンによる保護管の磨耗について、設計当時からの考え方を整理するとともに、三次元熱流動解析により得られている流速分布から、エロージョン発生の可能性を評価した。

１．エロージョンに対する考え方

設計当時、一般論として流速が 6 m/s 以下ではエロージョンは問題とならない[1]ことを文献調査で確認していた。濃縮缶内は、物理的なかくはんを行っておらず、加熱により生じる熱流動のみであることから、一般的に流速は 1 m/s 以下と考えられ、よってエロージョンは問題にならないと評価した。

なお、その後の文献調査でも、スラリーとして平均粒径 200μｍの球形天然珪砂（密度は下記のバリウム-ストロンチウム硝酸塩の密度より若干小さいものの、共有結合を有する硬い物質）を含む水を用いたサンドエロージョン試験において、3ｍ/s までの流速でエロージョン速度が小さいという結果が得られていることを確認した[2]。

また、実燃料から調製された放射性物質を含んだ廃液を減圧下で濃縮した試験において、六ヶ所再処理工場の条件相当（45000 MWd/tU、□ L/tU）の濃縮液（ホット）で白色の浮遊しやすい固体の析出が確認され、同様の組成の模擬液（コールド）を用いた濃縮試験でも同じような析出が生じた。その析出はバリウム-ストロンチウム硝酸塩（イオン結晶）であり、固着性のものではなく、濃縮液を揺らすと容易に分散したので、エロージョンには影響しないと判断した。

実機における析出成分もバリウム-ストロンチウム硝酸塩が主成分と想定されることから、エロージョンについては問題ないと考えるが、実運転状態を模擬した三次元熱流動解析の結果から、エロージョン発生の可能性を再度評価した。

（三次元熱流動解析の結果については別紙参照）

２．エロージョン発生の可能性の評価

三次元熱流動解析から得られた最大流速は0.21 m/sであり、エロージョンが問題となるような流速ではなかった。なお、最大流速が確認された場所は、濃縮缶中心部付近（当該保護管とは異なる場所）であった。

また、濃縮缶の最大処理時の加熱量は設計上□ kWであり、熱流動解析条件（コイル3本での運転時）での加熱量□ kWの約□ 倍となる。保守的に、濃縮缶内の対流による流速が加熱量に比例して増加する[※1]とした場合、最大処理時における濃縮缶内の最大流速は0.34 m/sとなる。このことから、処理量が多くなったとしてもエロージョンが問題となるものではないと評価した。

※1　加熱量の増加によるエネルギーが全て対流の駆動力（ヘッド）の増加に変化すると仮定する。また、対流によるヘッドの流動損失は流速の1乗～2乗に比例して変化するが、これを1乗に比例すると仮定することで、保守的な評価とした。

1）原徹編「化工建設便覧」（化学工業社）
2)「高クロム白鋳鉄のサンド・エロージョン速度のスラリー速度依存性」
（日本金属学会誌，57）

別　紙

三次元熱流動解析結果

(1) 解析目的

濃縮缶の熱対流による流動状態を数値的に予測し、濃縮缶内の流速分布、流れ方向及び淀み領域の有無を把握するため、三次元熱流動解析を実施した。

(2) 解析対象

図１に示す範囲を解析対象とし、加熱コイル及び加熱ジャケットからの発熱を考慮し解析を行った。

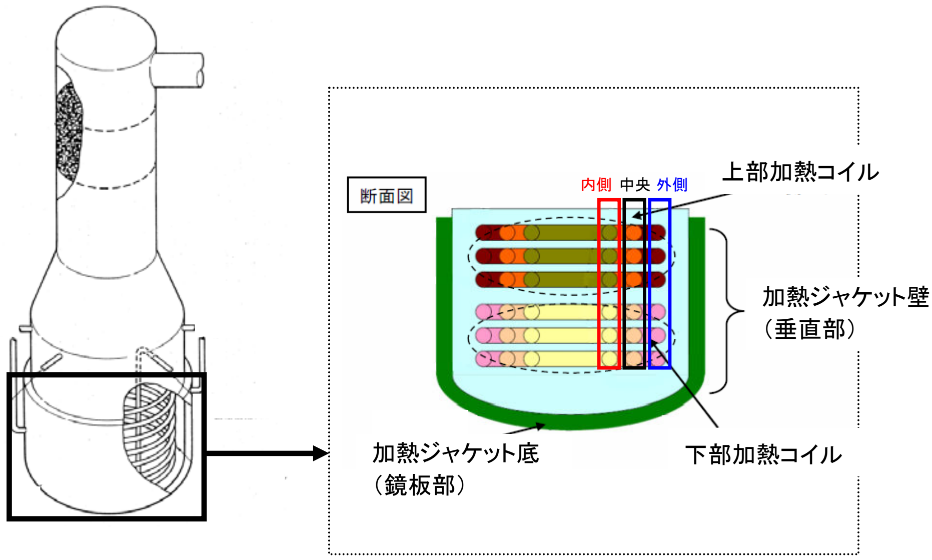


図１　解析対象

(3) 解析条件

これまでの運転において恒常的に生じていた濃縮缶内の流速を評価するために、運転実績※1をふまえ、加熱コイル３本で運転した場合の解析を実施した。

解析モデルの作成に際しては、濃縮缶内の廃液の流れを解析する目的のために、流動に支配的な影響を及ぼす大型内部構造品を実機形状寸法でモデル化した三次元 CAD データを用いて、汎用熱流体解析プログラム STAR-CCM+によって三次元メッシュを作成した。その後、汎用熱流体解析プログラム STAR-CD によって、三次元熱流動解析を実施した（図２　参照）。

解析にあたって、濃縮終了時点での高レベル濃縮廃液の密度、比熱、熱伝導率、粘度といった物性値については設計図書に示される値を用い、解析ステップごとに算出される温度による物性値の変化を都度反映させ、濃縮缶内の流速分布図を求めた。また、伝熱面であるコイル及びジャケットの境界条件としては、運転中のコイル及びジャケットの廃液側には熱流束固定の壁面境界、停止中のコイルには断熱の壁面境界を設定した。熱流束については、設計値を用いた。

※１　濃縮缶は、6 本あるコイルから使用するコイルを選択することにより、目標とする処理量（㎥/h）に応じて加熱量を調整している。アクティブ試験での運転実績では、コイル 2 本による運転時間が全体の約 49%、コイル 3 本による運転が約 39%、コイル 4 本による運転が全体の約 12%であり、コイルの平均稼動本数は約 2.6 本であった。この平均稼動本数から、コイル 3 本での運転を解析条件として設定した。

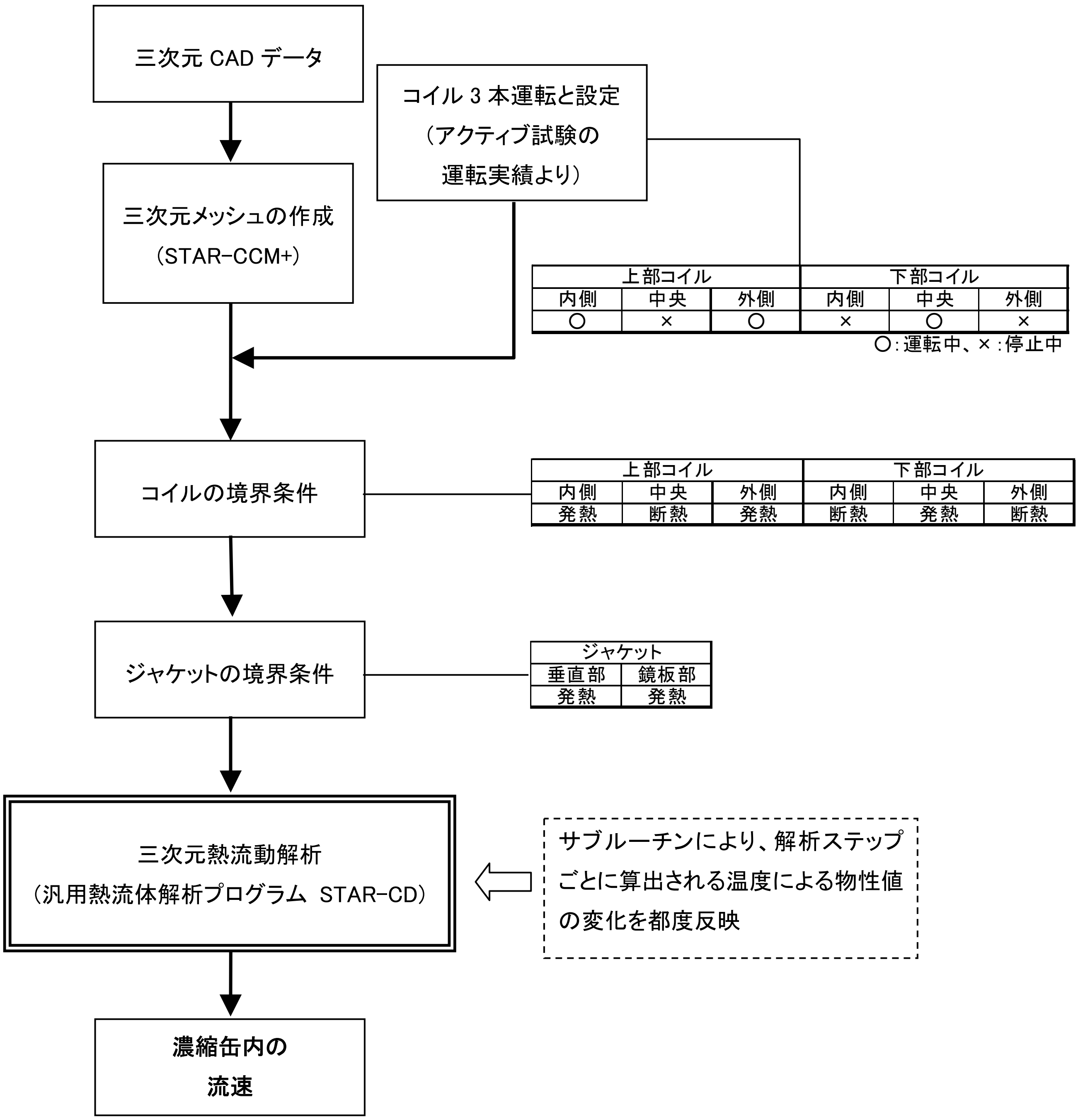


図２　解析手順

(4) 解析結果

最大流速の発生箇所は濃縮缶中心部付近の下降流であり、その値は 0.21 m/s であった。(図３　参照)

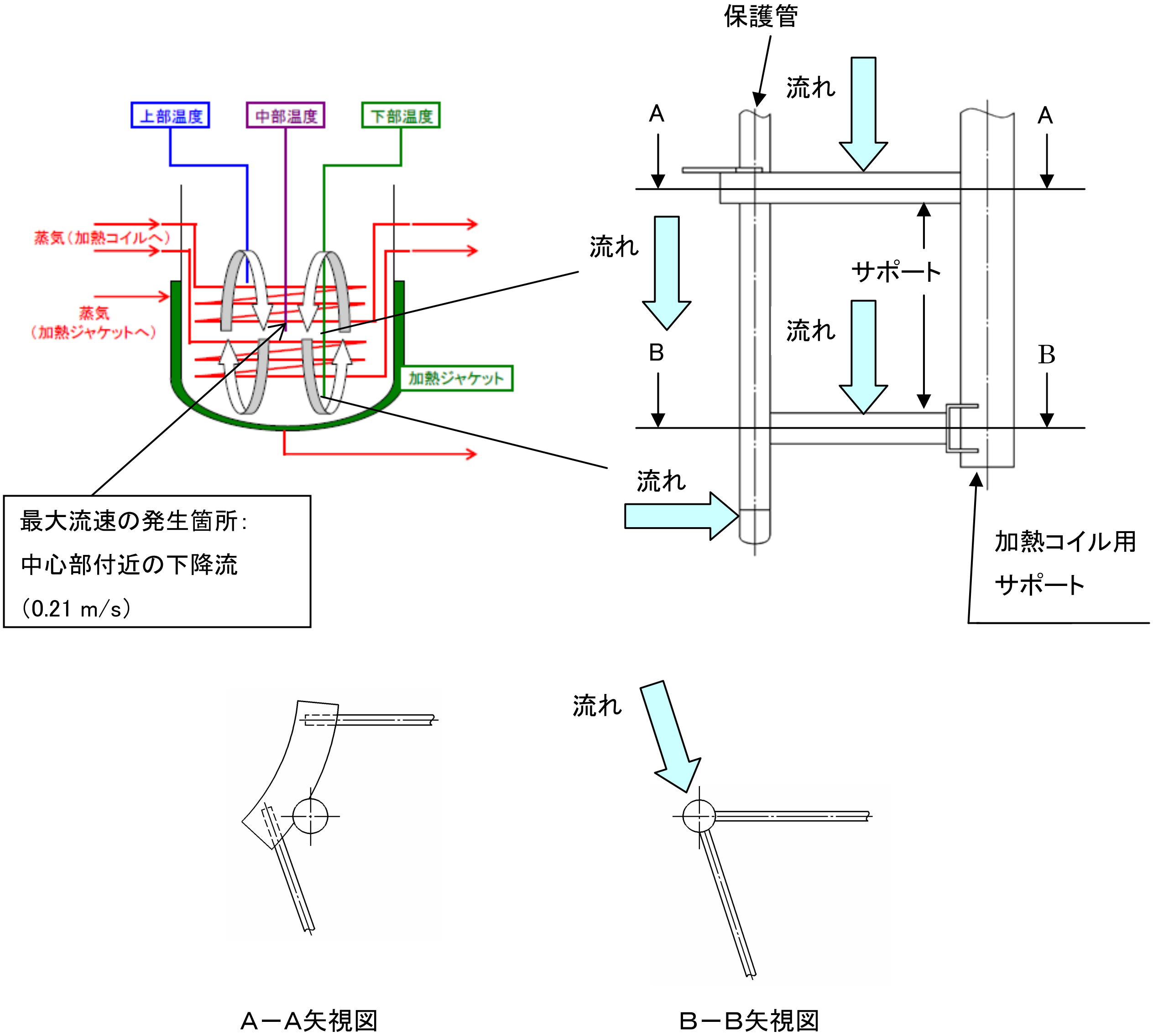


図３　保護管まわりの流れの状況図